





**Détermination automatisée du temps  
d'endurance de fluides antigivre par traitement  
d'images.**

**par  
David Gagnon, B. Sc.**

Mémoire présenté à l'Université du Québec à  
Chicoutimi comme exigence partielle du  
programme de maîtrise en ingénierie en vue de  
l'obtention du grade de Maître ès sciences  
appliquées (M. Sc. A.).

Québec, Canada

Août 2019

# Résumé

Au Canada, les avions peuvent être exposés à des conditions météorologiques telles que le brouillard givrant, la neige, la bruine verglaçante ou la pluie verglaçante. Ces conditions peuvent mener au développement de givre sur les ailes. Des fluides antigivre sont utilisés pour éviter des accidents lors du décollage en raison de givre sur les ailes lorsque les conditions climatiques l'exigent.

Pour être homologués, ces fluides doivent subir une série d'essais explicités dans la norme ARP5485: «Endurance Time Tests for Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids SAE Type II, III, and IV ». Celle-ci décrit les différents essais d'endurance utilisés pour déterminer le temps d'endurance de ces fluides sous différentes formes de précipitations givrantes telles que la neige, le brouillard, la bruine et le verglas. Le temps d'endurance est le temps pour lequel le fluide antigivre est jugé efficace dans des conditions climatiques données.

Les essais d'endurance doivent être réalisés dans un laboratoire habilité à homologuer la performance des fluides antigivre utilisés sur les avions en attente de décollage. Le Laboratoire International des Matériaux Antigivre (LIMA) est un laboratoire d'envergure internationale habilité à homologuer les fluides en accord avec les normes de la Society of Automotive Engineers (SAE), soit les Aerospace Material Specifications (AMS) et les Aerospace Standards (AS).

Les techniciens scientifiques du LIMA effectuent les essais d'endurance à l'intérieur de chambres climatiques permettant de reproduire les conditions expérimentales voulues à la demande et de façon uniforme pour la durée complète de l'essai. Les essais peuvent durer jusqu'à 12 heures et nécessitent un contrôle précis de la température et de l'intensité des précipitations. Le fluide antigivre est versé sur des plaques d'aluminium inclinées de 10° par rapport à l'horizontale à l'intérieur de la chambre climatique pour simuler la surface d'une aile d'avion en attente de décollage sous diverses conditions climatiques.

Le technicien scientifique doit surveiller l'état de la plaque recouverte de fluide de façon à déterminer le temps d'endurance du fluide dans les conditions expérimentales en cours. Différentes

formes de contaminations gelées peuvent apparaître sur la plaque et doivent être repérées par celle-ci. Pour ce faire, une fenêtre permet l'inspection visuelle de l'état de la plaque sans perturber l'expérience.

Le critère d'échec dépend de l'évaluation visuelle de la plaque par le technicien scientifique, puisqu'il nécessite de repérer les contaminations gelées ainsi que de calculer mentalement la proportion de la plaque qu'elles occupent. Cette évaluation est subjective et dépend de plusieurs facteurs.

Tous ces facteurs pourraient introduire de la variabilité dans le temps d'endurance déterminé par une même personne qui referait l'essai à plusieurs reprises. De plus, différentes personnes détermineraient peut-être des temps d'endurance différents pour un même essai? Aussi, la nécessité d'une supervision permanente rend la procédure fastidieuse puisque l'essai peut durer jusqu'à 12 heures.

L'objectif de ce mémoire est d'élaborer une méthode automatisée permettant de déterminer le temps d'endurance de fluides antigivre de type II, III et IV par traitement d'images. Trois types d'essais d'endurance en particulier sont ciblés dans le cadre de ce projet: les essais d'endurance au brouillard givrant (WSET), à la pluie verglaçante légère (LZR) et à la neige (SNW).

Pour ce faire, un algorithme différent pour chacun de ces types d'essais a été créé afin de détecter le givre sur la plaque d'essais et d'évaluer le critère d'échec respectif à partir des images prises par un appareil photo automatiquement et à intervalle régulier. Ces algorithmes ont été implémentés à l'aide de MATLAB.

Afin de développer ces algorithmes et d'évaluer la validité de leurs résultats, 2 essais WSET, 7 essais LZR et 7 essais SNW ont été réalisés dans les chambres climatiques du LIMA en utilisant le montage expérimental prescrit.

Les temps d'endurance obtenus par les algorithmes ont été comparés avec les temps d'endurance déterminés par le technicien scientifique présent lors des essais. Des 13 essais pour lesquels les images ont pu être utilisées, le temps d'endurance trouvé par les algorithmes n'était valide que pour 3 d'entre eux, c'est-à-dire qu'il y avait un écart de moins de 5% entre le temps d'endurance déterminé par le technicien présent et celui produit par le programme MATLAB.

De plus, un groupe de trois techniciens scientifiques ont déterminés les temps d'endurance de ces essais à partir des photos de ceux-ci. Les moyennes de ces temps d'endurance et leur déviation standard ont été calculées. Les temps d'endurance obtenus par les algorithmes ont ensuite été comparés avec ces valeurs moyennes.

Des 13 essais pour lesquels les images ont pu être utilisées, le temps d'endurance trouvé par les algorithmes était valide pour 11 d'entre eux, c'est-à-dire que soit il était à l'intérieur d'une déviation



standard de la moyenne des techniciens, soit il y avait un écart de moins de 5% entre ceux-ci.

Les 2 essais pour lesquels le temps d'endurance trouvé par les algorithmes n'était pas valide étaient des essais de neige. Pour ces essais, un problème important de réflexion de lumière sur la plaque diminuait la qualité des photos.

En conclusion, les algorithmes développés sont efficaces pour déterminer le temps d'endurance de fluides antigivre lorsque ce temps d'endurance est comparé à celui déterminé par les techniciens scientifiques ayant utilisés les mêmes données: les photos. Cependant, pour une raison qui pourra être explorée dans des travaux futurs, les algorithmes se sont montrés inefficaces pour déterminer le temps d'endurance lorsque celui-ci est comparé à celui constaté par le technicien présent lors de l'essai.

# Remerciements

Je tiens à remercier M. Hassan Ezzaidi, mon directeur de recherche, professeur titulaire et directeur des programmes aux cycles supérieurs en ingénierie à l'Université du Québec à Chicoutimi pour avoir dirigé mes travaux, pour sa confiance et son enseignement.

Je remercie également M. Christophe Volat, mon codirecteur de recherche, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi et directeur du Laboratoire International des Matériaux Antigivre pour son accueil au laboratoire de recherche, pour son soutien, son encadrement et ses précieux conseils.

Je remercie Mme. Caroline Laforte, ma codirectrice de recherche, professeure chercheuse au LIMA, pour son accompagnement soutenu, son expertise et son entière disponibilité.

Je suis aussi reconnaissant envers M. Jean-Denis Brassard, professeur chercheur au LIMA, pour son aide essentielle lors de l'expérimentation et de l'interprétation des résultats.

Je remercie également Mme. Diane Paradis, Mme. Nathalie Gagné et Mme. Shan Yang, assistantes de recherche au LIMA, pour leur expertise et les données qu'ils m'ont fournies.

Je suis reconnaissant envers M. Carol Mercier, technicien en électrotechnique au LIMA, pour son aide avec les montages expérimentaux.

Je désire remercier ma conjointe Catherine et mon fils Gabriel pour leurs encouragements, leur compréhension, leur soutien indéfectible et le bonheur qu'ils m'apportent. Je n'aurais pu mener à bien ce projet sans eux.

# Table des matières

<b>Liste des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	2
1.2 Problématique . . . . .	3
1.3 Objectifs . . . . .	5
1.3.1 Objectif principal . . . . .	5
1.3.2 Objectifs secondaires . . . . .	5
1.4 Méthodologie . . . . .	6

1.5	Structure du mémoire . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Givrage et fluides antigivre</b>	<b>11</b>
2.1	Givrage . . . . .	12
2.2	Types de précipitations givrantes . . . . .	13
2.3	Fluides antigivre . . . . .	14
2.4	Homologation des fluides antigivre . . . . .	15
2.5	Essais d'endurance . . . . .	15
2.6	Contamination gelée . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Expérimentation</b>	<b>18</b>
3.1	Description des essais . . . . .	20
3.1.1	Essais d'endurance au brouillard givrant (WSET) . . . . .	20
3.1.2	Essais d'endurance à la pluie verglaçante légère (LZR) . . . . .	22
3.1.3	Essais d'endurance à la neige (SNW) . . . . .	25
3.2	Description du montage . . . . .	28

3.2.1	Essais d'endurance au brouillard givrant (WSET) . . . . .	30
3.2.2	Essai d'endurance à la pluie verglaçante légère (LZR) . . . . .	31
3.2.3	Essais d'endurance à la neige (SNW) . . . . .	32
3.3	Paramètres expérimentaux . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Résultats expérimentaux</b>	<b>37</b>
4.1	Essais d'endurance . . . . .	38
4.2	Temps d'endurance . . . . .	42
4.3	Photos de l'échec . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Méthodes de détection</b>	<b>60</b>
5.1	Représentation numérique des images dans MATLAB . . . . .	61
5.2	Histogramme de l'image . . . . .	62
5.3	Algorithme d'Otsu . . . . .	64
5.4	Ajustement gamma . . . . .	65
5.5	Convolutions discrètes . . . . .	67

5.6	Filtre gaussien . . . . .	69
5.7	Contours . . . . .	70
5.8	Détecteur de Canny . . . . .	71
5.9	Vue orthogonale . . . . .	73
5.10	Région connectée . . . . .	74
5.11	Algorithme de réduction du bruit basé sur le filtre de Kalman . . . . .	76
5.11.1	Utilisation des filtres de Kalman pour l'élimination de faux positifs . . . . .	78
5.12	Représentation HSV . . . . .	79
5.13	Filtre homomorphique . . . . .	80
5.14	Détermination du pourcentage de l'aire givrée de la plaque . . . . .	82
5.15	Algorithme pour les essais au brouillard givrant . . . . .	83
5.16	Algorithme pour les essais de pluie verglaçante légère . . . . .	88
5.17	Algorithme pour les essais de neige . . . . .	94
5.18	Algorithme pour la segmentation automatique de la plaque . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Analyse des résultats</b>	<b>104</b>

6.1	Comparaison des temps d'endurance . . . . .	105
6.1.1	Méthodologie . . . . .	105
6.1.2	Brouillard givrant . . . . .	107
6.1.3	Pluie verglaçante légère . . . . .	108
6.1.4	Neige . . . . .	111
6.2	Discussion . . . . .	113
6.2.1	Analyse des résultats . . . . .	113
6.2.2	Causes d'erreurs . . . . .	116
6.2.3	Variabilité des temps d'endurance . . . . .	118
6.2.4	Objectivité . . . . .	119
6.2.5	Limites . . . . .	119
6.2.6	Améliorations . . . . .	121
<b>7</b>	<b>Conclusions et recommandations</b>	<b>123</b>
7.1	Conclusions . . . . .	123
7.2	Recommandations . . . . .	125



<b>Bibliographie</b>	<b>126</b>
 <b>A Photos au moment de l'échec</b>	 <b>129</b>
A.1 Essais de brouillard verglaçant . . . . .	130
A.2 Essais de pluie verglaçante légère . . . . .	131
A.3 Essais de neige . . . . .	134
 <b>B Code MATLAB</b>	 <b>137</b>
B.1 Détection du givre pour les essais WSET . . . . .	137
B.2 Détection du givre pour les essais LZR . . . . .	140
B.3 Détection du givre pour les essais SNW . . . . .	143
B.4 Extraction de la plaque . . . . .	145
B.5 Segmentation automatique de la plaque pour les essais SNW et LZR . . . . .	147
 <b>C Fonctions MATLAB</b>	 <b>155</b>
C.1 Filtre de Kalman . . . . .	155
C.2 Filtre homomorphique . . . . .	157

# Liste des figures

3.1	Zone d'échec pour un essai WSET [13]. . . . .	21
3.2	Un essai WSET au moment de l'échec. . . . .	21
3.3	Disposition de la plaque et des réceptacles de références pour l'essai avec le fluide antigivre. . . . .	24
3.4	Montage expérimental montrant la machine à neige au-dessus de la plaque d'essai. . . . .	25
3.5	Interprétation de la neige blanche dans un essai SNW. . . . .	27
3.6	Échec par dilution d'un essai de neige. . . . .	28
3.7	Basler acA1300-200uc avec une lentille Kowa 8mm. . . . .	30
3.8	Détail du montage pour un essai WSET. . . . .	31
3.9	Chambre climatique 9M du LIMA utilisée pour les essais de pluie verglaçante légère. . . . .	32
3.10	Montage avant le début de l'essai. . . . .	33
3.11	Pendant l'essai. Le fluide antigivre (vert) est sur la plaque. De la neige est perceptible sur la plaque. . . . .	34
4.1	Photographies d'un essai de brouillard givrant typique (WS8233). . . . .	39
4.2	Photographies d'un essai de pluie verglaçante légère typique (LZRB002). . . . .	40
4.3	Photographies d'un essai de neige typique (SNWH475). . . . .	41

4.4	WS8233. . . . .	44
4.5	WS8234. . . . .	45
4.6	LZRB001. . . . .	47
4.7	LZRB002. . . . .	48
4.8	LZRB003. . . . .	49
4.9	LZRB004. . . . .	50
4.10	LZRB006. . . . .	51
4.11	LZRB007. . . . .	52
4.12	SNWH473. . . . .	54
4.13	SNWH475. . . . .	55
4.14	SNWH476. . . . .	56
4.15	SNWH477. . . . .	57
4.16	SNWH478. . . . .	58
4.17	SNWH479. . . . .	59
5.1	Détection du givre et histogramme pour un essai de neige. . . . .	63
5.2	Effet de l'ajustement gamma. . . . .	66
5.3	Fonction de Gauss. . . . .	69
5.4	Résultat de l'application d'un filtre gaussien. . . . .	70
5.5	Résultat de l'application de l'algorithme de Canny pour la détection des contours. . .	73
5.6	Vue orthogonale de la plaque. . . . .	74
5.7	Résultat d'un algorithme conservant uniquement la plus grande région connectée. . .	75
5.8	Application du filtre de Kalman sur un essai de pluie verglaçante. . . . .	79

5.9	Filtre homomorphique. . . . .	82
5.10	Algorithme de détection du givre pour un essai de brouillard givrant (WS8234). . .	85
5.11	Algorithme de détection du givre pour un essai de brouillard givrant (WS8234): partie 2 . . . . .	86
5.12	Algorithme de détection du givre pour un essai de brouillard givrant typique: partie 3 (WS8234). . . . .	87
5.13	Algorithme de détection du givre pour un essai de pluie verglaçante légère typique: partie 1 (LZRB002). . . . .	91
5.14	Algorithme de détection du givre pour un essai de pluie verglaçante légère typique: partie 2 (LZRB002). . . . .	92
5.15	Algorithme de détection du givre pour un essai de pluie verglaçante légère typique: partie 3 (LZRB002). . . . .	93
5.16	Algorithme de détection du givre pour un essai de neige (SNWH477). . . . .	96
5.17	Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique. .	100
5.18	Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique: partie 2. . . . .	101
5.19	Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique: partie 3. . . . .	102
5.20	Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique: partie 4. . . . .	103
6.1	Réflexions sur la plaque lors d'un essai de neige. . . . .	117
6.2	Goutte d'eau sur la lentille. . . . .	120
A.1	WS8233. . . . .	130
A.2	WS8234. . . . .	130
A.3	18LZRB001. . . . .	131

A.4	18LZRB002.	131
A.5	18LZRB003.	132
A.6	18LZRB004.	132
A.7	18LZRB006.	133
A.8	18LZRB007.	133
A.9	SNWH473.	134
A.10	SNWH475.	134
A.11	SNWH476.	135
A.12	SNWH477.	135
A.13	SNWH478.	136
A.14	SNWH479.	136

# Liste des tableaux

3.1	Temps d'endurance minimal du fluide afin de se conformer aux exigences de la SAE en fonction du Type [10] . . . . .	22
3.2	Paramètres expérimentaux de la norme ARP5485 pour les essais de pluie verglaçante légère selon la méthode B (LZR-B) [5]. . . . .	23
3.3	Paramètres expérimentaux pour les essais d'endurance au brouillard givrant . . . .	35
3.4	Paramètres expérimentaux pour les essais d'endurance de pluie verglaçante légère .	35
3.5	Paramètres expérimentaux pour les essais d'endurance de neige . . . . .	36
4.1	First Ice Event (FIE) pour les essais d'endurance au brouillard givrant . . . . .	42
4.2	Temps d'endurance pour les essais d'endurance de pluie verglaçante légère . . . .	42
4.3	Temps d'endurance pour les essais d'endurance de neige . . . . .	43
6.1	Temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de brouillard givrant. . . . .	107
6.2	Pourcentage d'écart entre les temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de brouillard givrant. . . . .	108
6.3	Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour les essais de brouillard givrant. . . . .	108
6.4	Temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de pluie verglaçante légère. . . . .	109

6.5	Pourcentage d'écart entre les temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de pluie verglaçante légère. . . . .	109
6.6	Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour les essais de pluie verglaçante légère. . . . .	110
6.7	Temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de neige. . . . .	111
6.8	Pourcentage d'écart entre les temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de neige. . . . .	112
6.9	Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour les essais de neige. . . . .	112
6.10	Temps d'endurance obtenus par les techniciens et l'algorithme pour tous les essais. . . . .	114
6.11	Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour tous les essais. . . . .	115
6.12	Compte des réussites et échecs des algorithmes pour la détermination du temps d'endurance. . . . .	116





# Liste des symboles

<b>G</b>	Gain	
<b>K</b>	Gain de Kalman	
<b>O</b>	Image observée	
<b>I</b>	Image prédite	
<b>R</b>	Rapport de qualibration de l'intensité des précipitations	
$I_{cal}$	Moyenne de la quantité de précipitations recueillie par les réceptacles de calibration	$\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$
$I_{ref}$	Moyenne de la quantité de précipitations recueillie par les réceptacles de référence	$\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$
$I_{plaque}$	Estimation de l'intensité des précipitations arrivant sur la plaque	$\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$

# Liste des abréviations

<b>AMS</b>	Aerospace Material Specification.
<b>ARP</b>	Aerospace Recommended Practice.
<b>FIE</b>	First Ice Event.
<b>FRST</b>	Essais de gelée (Frost Test).
<b>FZDZ</b>	Essais de bruine verglaçante (Freezing Drizzle test).
<b>FZFG</b>	Essais de brouillard givrant (Freezing Fog test).
<b>FZRA</b>	Essais de la pluie verglaçante (Freezing Rain).
<b>HHET</b>	Essais d'endurance à l'humidité extrême (High Humidity Endurance Test).
<b>HSV</b>	Hue, saturation, maximum value.
<b>LIMA</b>	Laboratoire international des matériaux antigivre.

<b>LOUT</b>	Température minimale d'utilisation opérationnelle (Lowest Operational Usage Temperature).
<b>LZR</b>	Essais de pluie verglaçante légère (Light Freezing Rain test).
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers.
<b>SNW</b>	Essai de neige (Snow test).
<b>UQAC</b>	Université du Québec à Chicoutimi.
<b>WSET</b>	Essais d'endurance à l'eau pulvérisée (Water Spray Endurance Test).

# **Chapitre 1**

## **Introduction**

## 1.1 Contexte

Au Canada, les avions peuvent être exposés à des conditions météorologiques telles que le brouillard givrant, la neige, la bruine verglaçante ou la pluie verglaçante. Ces conditions peuvent mener au développement de givre sur les ailes. L'accumulation de glace ou de neige sur les ailes des avions modifie les propriétés aérodynamiques de l'appareil lors du décollage [1] [2]. Une accumulation d'épaisseur très faible (0,4 mm) peut modifier l'écoulement de l'air suffisamment pour provoquer une diminution de la portance de l'avion [3]. La portance représente la composante verticale de la force exercée sur l'aile par la masse d'air déplacée par celle-ci. Plusieurs accidents sont survenus lors du décollage en raison de l'accumulation de givre sur l'avion [4]. Des fluides antigivre sont utilisés pour éviter ce problème lorsque les conditions climatiques avant le décollage sont propices à l'accumulation de givre sur les ailes.

Pour être homologués, ces fluides doivent subir une série d'essais explicités dans «Endurance Time Tests for Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids SAE Type II, III, and IV » [5]. Celle-ci décrit les différents essais d'endurance utilisés pour déterminer le temps d'endurance de ces fluides sous différentes formes de précipitations givrantes telles que la neige, le brouillard, la bruine et le verglas. Le temps d'endurance est le temps pour lequel le fluide antigivre est jugé efficace dans des conditions climatiques données. Ainsi, le pilote peut choisir le fluide adéquat en prenant en considération le temps avant le décollage et les conditions climatiques actuelles.

Il existe également des fluides dégivrants, nommés Type I, qui sont appliqués à chaud afin d'enlever la glace présente avant d'appliquer les fluides antigivre. Ce mémoire porte sur les fluides antigivre seulement.

Les essais doivent être réalisés dans un laboratoire habilité à homologuer la performance des flu-

ides antigivre utilisés sur les avions en attente de décollage. Le Laboratoire International des Matériaux Antigivre (LIMA) est un laboratoire d'envergure internationale de par sa participation aux comités internationaux encadrant l'utilisation des fluides utilisés en aéronautique. Il est habilité à homologuer les fluides en accord avec les normes de la Society of Automotive Engineers (SAE) Aerospace Material Specifications (AMS) et Aerospace Standards (AS). Il est situé au Canada à Saguenay et est affilié à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).

Les essais doivent répondre aux normes « Deicing/Anti-Icing Fluid, Aircraft SAE Type » (AMS1424) [6] et « Fluid, Aircraft Deicing/Anti-Icing, Non-Newtonian (Pseudoplastic), SAE Types II, III, and I » (AMS1428) [7] qui donnent les spécifications des fluides utilisés en aérospatiale. Ils sont effectués au LIMA à l'intérieur de chambres climatiques permettant de reproduire les conditions expérimentales voulues à la demande et de façon uniforme pour la durée complète de l'essai. Les essais peuvent durer jusqu'à 12 heures et nécessitent un contrôle précis de la température et de l'intensité des précipitations. De plus, les précipitations doivent être uniformes et produites selon les normes.

## **1.2 Problématique**

Pour réaliser les essais d'endurance afin d'homologuer les fluides antigivre, des plaques d'aluminium inclinées de  $10^\circ$  par rapport à l'horizontale sont disposées à l'intérieur de la chambre climatique pour simuler la surface d'une aile d'avion en attente de décollage sous diverses conditions climatiques. Avant le début de l'essai, la chambre est préalablement refroidie à la température prescrite. Le fluide à homologuer et les plaques, étant à l'intérieur de celle-ci, sont donc refroidis à la même température.

Le technicien scientifique verse le fluide sur la plaque de la façon la plus uniforme possible. Ensuite, celui-ci quitte la chambre et débute les précipitations. Des thermocouples hygromètres et des plaques

témoins (sans fluide) permettent de vérifier que les paramètres expérimentaux tels la température et l'intensité des précipitations sont à l'intérieur des marges acceptables selon la norme. Les données sont enregistrées sur un ordinateur.

La personne habileté à le faire doit surveiller l'état de la plaque recouverte de fluide de façon à déterminer le temps d'endurance du fluide dans les conditions expérimentales en cours. Le temps d'endurance d'un fluide est le temps de protection contre le givre qu'il procure pour des conditions climatiques données.

Différentes formes de contaminations gelées peuvent apparaître sur la plaque et doivent être repérées par celle-ci. Pour ce faire, une fenêtre permet l'inspection visuelle de l'état de la plaque sans perturber l'expérience.

Lorsqu'observé, le critère d'échec marque l'échéance du temps d'endurance. Ce critère prend deux formes, dépendamment du type de précipitations utilisées. Dans un premier cas, l'échec est déclaré lorsqu'une certaine proportion de la plaque est recouverte de givre. Dans l'autre cas, l'échec est déclaré lorsque le givre franchi une certaine frontière (imaginaire) sur la plaque.

Le critère d'échec dépend de l'évaluation visuelle de la plaque par le technicien scientifique, puisqu'il nécessite de repérer les contaminations gelées ainsi que de calculer mentalement la proportion de la plaque qu'elles occupent. Cette évaluation est subjective et dépend de plusieurs facteurs.

Premièrement, elle est faite à une certaine distance et avec un certain angle de vue pouvant introduire une parallaxe. Deuxièmement, elle est faite par une fenêtre et à travers les précipitations ce qui peut obstruer la vision. Troisièmement, les contaminations gelées peuvent être à plusieurs endroits et leur géométrie variable et irrégulière ce qui rend l'estimation de la surface recouverte difficile.

Tous ces facteurs pourraient introduire de la variabilité dans le temps d'endurance déterminé par une

même personne qui referait l'essai à plusieurs reprises. De plus, différentes personnes détermineraient peut-être des temps d'endurance différents pour un même essai?

Aussi, la nécessité d'une supervision permanente rend la procédure fastidieuse puisque l'essai peut durer jusqu'à 12 heures.

Ce projet de maîtrise vise à automatiser le processus de simulation dans l'optique de minimiser les erreurs reliées.

## **1.3 Objectifs**

### **1.3.1 Objectif principal**

L'objectif principal de ce mémoire est d'élaborer une méthode automatisée permettant de déterminer le temps d'endurance de fluides antigivre de type II, III et IV par traitement d'images. Trois types d'essais d'endurance en particulier sont ciblés dans le cadre de ce projet : les essais d'endurance au brouillard givrant (WSET), à la pluie verglaçante légère (LZR) et à la neige (SNW).

### **1.3.2 Objectifs secondaires**

Le premier objectif secondaire de ce mémoire est de vérifier si la méthode automatisée donne des résultats similaires à un groupe de techniciens scientifiques qualifiés dans l'évaluation des temps d'endurance. Cet objectif viendra confirmer la validité des résultats expérimentaux et justifier la pertinence d'utiliser une méthode automatisée dans les laboratoires d'essais.

Le deuxième objectif secondaire est d'implémenter la méthode automatisée sous forme de logiciel



pouvant être utilisé pour assister le technicien scientifique lors d'essais d'endurance notamment en l'alertant quelque temps avant l'échec de l'essai.

## **1.4 Méthodologie**

Afin de réaliser les objectifs précédemment mentionnés, 2 essais WSET, 7 essais LZR et 7 essais SNW ont été réalisés dans les chambres climatiques du LIMA en utilisant le montage expérimental prescrit [5].

Durant chaque essai, des images sont prises par un appareil photo automatiquement et à intervalle régulier. Celles-ci sont transmises en temps réel à un ordinateur muni du logiciel MATLAB qui identifie les contaminations gelées en utilisant différents algorithmes dépendamment du type d'essai réalisé. Plusieurs étapes sont nécessaires pour reconnaître le givre correctement.

Premièrement, la plaque d'essai doit être reconnue dans l'image. Une approche automatisée est proposée. Si l'approche automatisée ne donne pas le résultat escompté, le technicien scientifique peut sélectionner manuellement sur l'image les coins de la plaque pour en identifier le contour. Les corrections géométriques nécessaires sont ensuite effectuées de façon à obtenir une vue orthogonale de la plaque.

Deuxièmement, les images subissent un prétraitement visant à améliorer la qualité de l'image à analyser. Ce prétraitement a pour objectifs de réduire le bruit, éliminer les artefacts et uniformiser l'éclairage.

Ensuite, la détection de la contamination gelée est effectuée. Toute nouvelle contamination détectée s'accumule à celle trouvée dans les images précédentes dans une représentation binaire givre/non-givre

de la plaque qui évolue avec chaque nouvelle image.

Cette représentation binaire peut ensuite être utilisée soit pour calculer précisément la proportion de givre ou de neige recouvrant la surface la plaque, soit pour déterminer si le givre a franchi une certaine frontière sur la plaque.

Le programme permet au technicien de suivre l'évolution du givre et d'être alerté lorsque le critère d'échec est observé. Il peut alors valider si le programme a correctement déterminé le temps d'endurance du fluide et arrêter l'essai, le cas échéant.

De plus, l'ensemble des données sont enregistrées afin de pouvoir effectuer, en post-traitement, la détermination du temps d'endurance. Ainsi, les résultats obtenus peuvent être comparés avec les résultats de quelques autres techniciens afin d'en évaluer la qualité et la répétabilité. Une interface graphique facilite la mise en oeuvre de cette procédure.

Ce projet de maîtrise vise donc à améliorer les résultats et à automatiser les essais déjà utilisés dans l'industrie. Afin qu'il soit pertinent, les résultats devront présenter une précision comparable à ceux obtenus par le personnel qualifié à la réalisation des essais par inspection visuelle. De plus, ils devront être répétables et reproductibles.

Deux avantages importants qu'a l'ordinateur par rapport à l'humain permettent de penser que le programme a la possibilité de performer aussi bien qu'un technicien scientifique. Premièrement, le traitement d'images par ordinateur permet d'identifier précisément les contours des zones de contaminations gelées. Deuxièmement, la surface givrée ou enneigée sera calculée exactement au lieu d'en faire une estimation visuelle.

L'interface graphique permet de spécifier le type de précipitations et le type de fluide utilisé afin de choisir un algorithme adapté à la situation. Cet interface présente l'évolution du givre sur la plaque de

façon binarisée, le temps écoulé et l'échec, s'il y a lieu. Il permet également d'enregistrer les essais et d'ajuster différents paramètres.

Pour détecter les frontières entre des zones givrées ou enneigées, plusieurs techniques de l'analyse d'image sont utilisées et dépendent du type d'essai réalisé. Par exemple, les images peuvent être binarisées en utilisant un seuil approprié. Ou encore, différents algorithmes de détection des frontières sont explorés afin d'obtenir des résultats satisfaisants.

Pour déterminer s'ils sont satisfaisants, les temps d'endurance déterminés par le programme sont comparés à ceux obtenus par quelques techniciens scientifiques du LIMA pour les trois différents types d'essais étudiés. Pour ce faire, la valeur moyenne des temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques sera calculée. Puis, l'incertitude absolue sur celle-ci sera estimée permettant d'évaluer s'il y a un écart significatif ou non entre le temps d'endurance obtenu par le programme MATLAB et celui obtenu par le personnel du LIMA.

De plus, chaque technicien identifiera les zones qu'il considère givrée sur la photo au moment de l'échec. Ces zones seront comparées à celles identifiées par le programme permettant de calculer le pourcentage d'écart entre les deux.

## **1.5 Structure du mémoire**

Ce mémoire est composé de sept chapitres. Le Chapitre 1, *Introduction*, est une introduction qui expose la problématique, l'objectif principal et les objectifs secondaires ainsi qu'un aperçu de la méthodologie utilisée.

Le Chapitre 2, *Givrage et fluides antigivre*, définit la contamination gelée et le givrage. Les différents

types de précipitations pouvant produire du givrage sur les avions en attente de décollage sont ensuite présentées. Ensuite, les fluides antigivre et les normes utilisées pour l'homologation de ceux-ci sont discutés. Finalement, les essais d'endurance sont décrits.

Le Chapitre 3, *Expérimentation*, est consacré à la description des expérimentations au LIMA. Ces expérimentations sont en fait les trois types d'essais d'endurance effectués pour lesquels des données (photos) ont été collectées soient les essais d'endurance au brouillard givrant (WSET), à la pluie verglaçante légère (LZR) et à la neige (SNW). Une description des essais, du montage et de la procédure expérimentale est présentée pour chacun de ces types de précipitations.

Le Chapitre 4, *Résultats expérimentaux*, expose les résultats des essais. Pour chaque type d'essais, une séquence d'images montrant l'évolution du givre dans le temps est présentée. Suit une discussion sur l'apparence et l'évolution du givre. Puis, le temps d'endurance déterminé par le personnel habilité à le faire est donné pour chacun des essais. Finalement, pour chacun des essais, une photo du moment auquel le critère d'échec est atteint selon le personnel du LIMA est présentée et discutée.

Le Chapitre 5, *Méthodes de détection*, discute de la reconnaissance du givre par traitement de l'image. Un exposé des éléments théoriques sous-jacent est d'abord effectué. Ensuite, les différents algorithmes sont présentés et expliqués à partir des éléments théoriques. Finalement, l'effet de chacune des étapes des algorithmes est illustré et discuté.

Le Chapitre 6, *Analyse des résultats*, commence par présenter les résultats obtenus par traitement de l'image. Les parties givrées reconnues par le programme sont comparées avec les images réelles pour chacun des essais jusqu'à l'échec. Le temps d'endurance déterminé par le programme est comparé à celui déterminé par le personnel du LIMA. Par la suite, les photos à ces deux temps sont comparées et les différences entre celles-ci analysées.

Le chapitre 7, *Conclusions et recommandations*, présente les conclusions et recommandations qui se dégagent de ce mémoire. En particulier, des améliorations à apporter lors de l'expérimentation et pour la détection du givre par traitement de l'image sont explorées. Puis, des suggestions pour l'implémentation du logiciel au LIMA sont proposées. Ensuite sont exposées des pistes de travaux de recherches d'approfondissement ou connexes aux travaux réalisés pour ce projet.

Le code MATLAB utilisé pour la mise en forme, le traitement et l'analyse des images est disponible en annexe. Se retrouve également en annexe des images illustrant les résultats principaux obtenus.

## **Chapitre 2**

# **Givrage et fluides antigivre**

Ce chapitre discute du phénomène de givrage et le problème qu'il pose pour le vol des avions. Les fluides antigivre et leur utilisation pour contrer les effets du givrage sur le vol des aéronefs sont également abordés.

Premièrement, le givrage est défini et les précipitations givrantes à l'étude pour ce projet sont présentées. Puis, les fluides antigivre et l'homologation de ceux-ci sont discutés. Finalement, les différentes formes que peut prendre la contamination gelée sont décrites.

## **2.1 Givrage**

Il existe plusieurs types de précipitations givrantes. Le type de précipitations dépend du profil vertical de température ainsi que la grosseur des gouttes qui sera traversé par l'eau dans l'atmosphère [8].

Le givrage est une réaction endothermique qui se produit lorsque des gouttes d'eau surfondues, c'est-à-dire qu'elles ont une température inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$ , entre en contact avec un obstacle telles que les ailes de l'avion dans le contexte de cette recherche. Ces gouttes surfondues sont dans un état instable et gèleront par nucléation de contact lorsqu'elles frapperont une surface solide. Le glace peut ensuite croître par accréation et finir par couvrir une partie importante de l'aile, provoquant une perte de portance de l'aéronef pouvant entraîner un accident au décollage [9].

Lorsque la température est sous le point de congélation, plusieurs types de précipitations peuvent causer du givre. Il est alors nécessaire d'utiliser le fluide antigivre approprié qui protégera les ailes de l'avion jusqu'au décollage, en fonction du type de précipitations, de l'intensité de celles-ci et de la température ambiante.

## **2.2 Types de précipitations givrantes**

Ce projet de recherche se concentre sur trois types de précipitations givrantes en particulier soit le brouillard givrant, la pluie verglaçante légère et la neige.

### **Brouillard givrant**

Ce type de précipitations est conçu pour simuler un avion en attente de décollage exposé à du brouillard givrant lorsque la température est inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$  [10]. Ces précipitations sont caractérisées par des gouttelettes d'eau surfondues très fines qui gèlent au contact de la plaque par le processus décrit ci-haut. Ces gouttelettes de diamètre d'environ  $22\mu\text{m}$  sont produites en faisant passer de l'eau dans une buze dans lequel de l'air comprimé est appliqué périodiquement.

### **Pluie verglaçante légère**

Ce type de précipitations est conçu pour simuler un avion en attente de décollage exposé à de la pluie verglaçante de faible intensité. Ces précipitations sont composées de gouttes d'eau surfondues de diamètre d'environ  $1000\mu\text{m}$  qui tombent sur la plaque à faible intensité et qui gèlent au contact de celle-ci.

En Amérique du Nord, la plupart des régions reçoivent moins de 10 heures de pluie verglaçante par année. Toutefois, ce type de précipitations est plus fréquent pour les régions à proximité du fleuve St-Laurent. Celles-ci peuvent recevoir plus de 30 heures de pluie verglaçante par année. [12]

### **Neige**

Ce type de précipitations est conçu pour simuler un avion en attente de décollage exposé à des chutes de neige de différentes intensités. Pour ce faire, de la neige est préalablement produite en laboratoire.



Cette neige artificielle est chargée dans un dispositif au-dessus de la plaque d'essai qui tourne de façon à la disperser uniformément sur celle-ci.

Les précipitations de neige sont importantes et fréquentes au Canada. Par exemple, à l'aéroport Montréal-Trudeau, entre 1981 et 2010, en moyenne 209,5cm de neige tombe chaque année [11].

## **2.3 Fluides antigivre**

Afin d'éviter les accidents, il est impératif que l'avion préserve ses caractéristiques aérodynamiques. Si les conditions atmosphériques sont propices à la formation de givre sur celui-ci avant le décollage, il est nécessaire d'avoir une stratégie permettant d'éviter que cette glace modifie la portance de l'aéronef.

La technique la plus utilisée pour éviter le givrage avant le décollage est l'utilisation de fluides dégivrants et de fluides antigivre. Ceux-ci sont des fluides possédant un point de congélation inférieur à celui de l'eau ce qui leur permet de faire fondre et d'absorber les précipitations en leur transférant de la chaleur.

La glace présente sur l'avion est d'abord enlevée à l'aide d'un fluide dégivrant de Type I appliqué à chaud. Par la suite, un fluide antigivre est appliqué afin d'éviter que le givre se reforme avant le décollage.

Puisque les précipitations sont absorbées par le fluide antigivre, celui-ci se dissout progressivement et devient de plus en plus froid. Il deviendra donc inefficace après un certain temps. La durée pendant laquelle le fluide est efficace dépend des conditions atmosphériques et du fluide utilisé. De fait, les fluides doivent être homologués et évalués sous différentes formes de dilutions de façon à permettre au pilote de choisir la quantité de fluide adéquate selon les conditions atmosphériques actuelles et le

temps restant avant le décollage.

Les fluides antigivre sont catégorisés en trois classe, Type II, Type III et Type IV, selon les performances antigivre et aérodynamiques. Ce sont essentiellement des solutions d'éthylène glycol, de diéthylène glycol et de propylène glycol. Des agents épaississants sont ajoutés au mélange pour augmenter la viscosité du fluide de façon à lui permettre de rester sur l'aile pour une longue période.

## **2.4 Homologation des fluides antigivre**

Les membres de la Society of Automotive Engineers (SAE) ont élaboré des normes afin d'encadrer le matériel utilisé en aéronautique. En particulier, pour les fluides antigivre, deux normes viennent spécifier l'efficacité minimale qu'ils doivent présenter afin de pouvoir être homologués pour l'utilisation commerciale : « Deicing/Anti-Icing Fluid, Aircraft SAE Type »[6] et « Fluid, Aircraft Deicing/Anti-Icing, Non-Newtonian (Pseudoplastic), SAE Types II, III, and I »[7]. Ces normes encadrent également la façon dont les essais doivent être effectués.

Pour chaque type de précipitations, les fluides sont soumis à des essais d'endurance pour différentes conditions climatiques dans les laboratoires accrédités, tel que le LIMA, afin de s'assurer qu'ils respectent les exigences minimales stipulées dans les devis.

## **2.5 Essais d'endurance**

Plusieurs types d'essais d'endurance existent afin de couvrir l'éventail de conditions météorologiques susceptible d'engendrer des dépôts de givre sur les avions : l'essai de brouillard givrant (FZFG), l'essai au brouillard givrant (WSET), l'essai à haute humidité (HHET), l'essai de gelée (FRST), l'essai de bru-

ine verglaçante (FZDZ), l'essais de pluie verglaçante (FZRA) et l'essais avec une boîte surrefroidie. Toutefois, ce mémoire porte exclusivement sur les essais de bruine verglaçante (WSET), les essais de pluie verglaçante légère (LZR) et les essais de neige (SNW).

Les essais d'endurance ont pour but de déterminer le temps d'endurance de façon contrôlée en laboratoire pour les fluides antigivre de type II, III et IV.

Une plaque à température ambiante froide simule une portion d'aile d'avion. Le fluide à évaluer est versé uniformément sur la plaque lorsqu'il est à la température ambiante. De façon générale, le temps d'endurance d'un fluide antigivre est le temps minimum d'exposition aux conditions climatiques spécifiques de l'essai nécessaire pour qu'un certain pourcentage ou une certaine région de l'aire de la plaque soit givré. Un thermomètre doit être situé près de la plaque de façon à s'assurer que celle-ci soit à la température spécifiée. La température doit être maintenue à  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  de la température spécifiée à l'aide d'un contrôle de température proportionnel et d'un système de ventilation adéquat. L'éclairage doit être suffisant pour observer l'évolution du givre sur la plaque sans toutefois interférer avec la température de l'air, du fluide ou de la plaque. Tous les instruments de mesures utilisés doivent être calibrés à la norme ISO 10012 à tous les six mois. Des réceptacles doivent être positionnés à proximité de la plaque afin de récolter des précipitations tout au long de l'essai. Ceux-ci sont ensuite pesés afin de s'assurer de l'intensité et de l'uniformité des précipitations. De plus, le diamètre médian des gouttelettes d'eau ou des flocons de neige doit être déterminé conformément à la norme.

## **2.6 Contamination gelée**

Les essais d'endurance menés avec les fluides antigivre sont basés sur la détection visuelle de la contamination gelée. Lorsque les précipitations arrivent sur le fluide, des cristaux de glace peuvent se

former à l'intérieur de celui-ci. De plus, il arrive que les précipitations ne soient pas complètement diluées dans le fluide ce qui entraîne une accumulation à la surface de celui-ci.

Plusieurs formes de contamination gelée peuvent être observées lors d'essais avec des fluides anti-givre [5] :

- Front glacé
- Plaque de glace
- Neige fondante
- Fins cristaux de glace disséminés
- Gelée à la surface du fluide
- Morceaux de glace claire partiellement ou complètement submergés dans le fluide
- Pont de neige à la surface du fluide.

Ces contaminations seront référées sous le nom général « givre ».

## **Chapitre 3**

# **Expérimentation**

Ce chapitre présente les essais menés au LIMA qui ont servi à créer et valider le programme MATLAB automatisant le processus de détermination du temps d'endurance. Premièrement, le déroulement des essais est expliqué. Par la suite, le montage expérimentale est décrit. Finalement, les paramètres expérimentaux et les fluides utilisés pour les différents essais sont présentés.

Trois types d'essais ont été réalisés dans les chambres climatiques, soit les essais d'endurance au brouillard givrant (WSET), les essais d'endurance à la pluie verglaçante légère (LZR) et les essais d'endurance de neige (SNW). Chacun de ces types d'essais a été réalisé avec différents fluides et différentes conditions expérimentales. Des photos ont été prises lors de 2 essais de brouillard givrant, 7 essais de pluie verglaçante légère et 7 essais de neige. Toutefois, des problèmes lors de la prise de mesures font en sorte qu'un des essais de pluie verglaçante et un des essais de neige sont inutilisables.

Plusieurs étapes sont nécessaires afin de permettre une reconnaissance du givre automatisée par analyse de l'image. Premièrement, une attention particulière doit être portée à la configuration de la chambre climatique notamment pour l'éclairage et le positionnement de l'appareil photo. Ensuite, l'essai est démarré. L'appareil photo prend des images à intervalle régulier et les enregistre sur l'ordinateur qui exécute le programme de reconnaissance dans MATLAB. Ce programme détermine la partie de l'image correspondant à la plaque d'essai à analyser. Puisque l'axe de l'appareil n'est pas nécessairement orthogonal à la plaque, le programme effectue une transformation affine pour obtenir une image orthogonale de la plaque afin de calculer l'aire givrée sans biais de perspective.

## 3.1 Description des essais

### 3.1.1 Essais d'endurance au brouillard givrant (WSET)

Pour ces essais, des plaques d'aluminium de 300mm par 100mm sont placées sur un système de refroidissement maintenant la température au haut de la plaque à  $(-5,0 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ . Celles-ci sont inclinées de  $10^{\circ}$  par rapport à l'horizontale.

Une quantité de 115mL de fluide antigivre à température pièce est versée sur la plaque de façon à la recouvrir entièrement. Après, un temps d'attente de 5 minutes, les précipitations sont démarrées, ce qui marque le début de l'essai d'endurance ( $t = 0$ ).

Les plaques sont alors exposées à des gouttelettes d'eau déminéralisée ayant un diamètre volumétrique médian de  $22\mu\text{m}$ . Au moins 50% de celles-ci doivent avoir un diamètre volumétrique médian entre  $15\mu\text{m}$  et  $35\mu\text{m}$ . L'intensité des précipitations est de  $(5,0 \pm 0,2) \frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$ . [13]

Le fluide s'écoule par l'effet de la gravité et s'amincit au haut de la plaque. Par ce fait, la glace ou front de glace, apparaît en premier lieu à la partie supérieure de la plaque et tend à descendre avec le temps.

Ces essais évaluent l'efficacité de protection anti-givre en terme de temps d'endurance (Endurance time test). Il existe deux critères afin de déterminer que le fluide a perdu son efficacité, appelés critères d'échec.

Le premier critère est lorsque le givre atteint la surface de la plaque située à 25mm sous le haut de la plaque et à 5mm des côtés nommés en anglais FIE pour First Ice Event (figure 3.1).

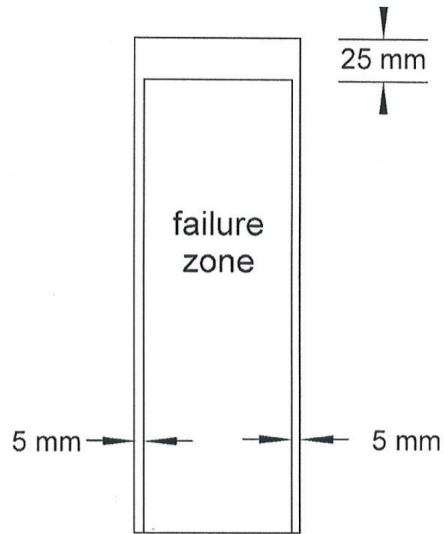


Figure 3.1: Zone d'échec pour un essai WSET [13].

La figure 3.2 montre un essai au moment de l'échec. Le périmètre de la zone d'échec a été surimposé pour une meilleur visualisation.



Figure 3.2: Un essai WSET au moment de l'échec.

Deuxièmement, l'échec est déclaré si 10% de la plaque est recouverte de mélange de neige mouillée (névasse) [13]. Le technicien scientifique note le temps écoulé depuis le début de l'essai lorsqu'il observe un de ces deux critères. Ce temps correspond au temps d'endurance du fluide antigivre pour les conditions expérimentales de l'essai.



La durée minimale des précipitations est de 30 minutes afin de vérifier que l'intensité des précipitations est conforme.

Pour être conformes, les fluides doivent avoir un temps d'endurance minimal qui dépend de leur type (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Temps d'endurance minimal du fluide afin de se conformer aux exigences de la SAE en fonction du Type [10]

Type	Temps d'endurance minimal min
II	30
III	20
IV	80

### 3.1.2 Essais d'endurance à la pluie verglaçante légère (LZR)

Pour ces essais, des plaques d'aluminium 500mm par 300mm avec une épaisseur de 3,2mm sont utilisées. Celles-ci sont inclinées de  $(10,0 \pm 0,2)^\circ$  par rapport à l'horizontale. Des gouttelettes d'eau d'un diamètre médian de  $(1000 \pm 100)\mu\text{m}$  sont projetées vers les plaques sur une distance de  $(7,0 \pm 0,5)\text{m}$  à l'intérieur de la chambre climatique maintenue à une température ambiante entre  $-10^\circ\text{C}$  et  $0^\circ\text{C}$ . Pour ces essais, l'humidité relative est d'au moins 40%. L'intensité moyenne des précipitations est de  $(13 \pm 0,5) \frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$  ou  $(25 \pm 0,5) \frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$ , selon la méthode utilisée. [5]

Pour ce projet, la méthode B a été utilisée. Les paramètres de celle-ci sont résumés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2: Paramètres expérimentaux de la norme ARP5485 pour les essais de pluie verglaçante légère selon la méthode B (LZR-B) [5].

Paramètre	Unités	Valeur
Température de l'air	°C	$-3 \pm 0,5$
Déviati�n standard de la température de l'air	°C	$\pm 0,3$
Intensité des précipitations	$\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$	$25 \pm 1,0$
Variati�n de l'intensité des précipitations sur une plaque	$\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$	$\leq 3,0$

Une quantité d'un litre de fluide antigivre est versé sur la plaque de façon à la recouvrir entièrement. Ensuite, les précipitations démarrent, ce qui marque le début de l'essai d'endurance ( $t = 0$ ). Ces essais évalue l'efficacité de protection anti-givre en terme de temps d'endurance (Endurance time test).

L'échec de l'essai survient lorsque 30% de la plaque est recouverte de givre. Le technicien scientifique note alors le temps écoulé depuis le début de l'essai. Ce temps correspond au temps d'endurance du fluide antigivre pour les conditions expérimentales de l'essai.

L'intensité et l'uniformité des précipitations doivent être vérifiées. Pour ce faire, la norme propose deux méthodes. Pour ce projet, la méthode A a été utilisé.

Dans un premier temps, un essai de calibration est effectué. Pour cet essai, 12 réceptacles de calibration carrés de  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 0.8\text{mm}$  d'épais avec des parois de 15mm sont installés à l'endroit où sera situé la plaque. 8 réceptacles de références ayant les mêmes dimensions sont placés autour des réceptacles de calibration. Tous les réceptacles ont été préalablement pesés.

Après l'essai de calibration, tous les réceptacles sont à nouveau pesés afin de déterminer la quantité de précipitation recueillie. Puis, le rapport  $R$  entre la moyenne de la quantité de précipitations recueillie

par les réceptacles de calibration  $I_{cal}$  et la moyenne de la quantité de précipitations recueillie par les réceptacles de référence  $I_{ref}$  est calculé comme suit :

$$R = \frac{I_{cal}}{I_{ref}} \quad (3.1)$$

Ensuite, l'essai est effectué avec le fluide antigivre. Les réceptacles de calibration sont remplacés par la plaque d'essai autour de laquelle sont replacés les 8 réceptacles de référence (Figure 3.3). La moyenne de la quantité de précipitation  $I_{ref}$  est calculée puis utilisée afin d'estimer l'intensité des précipitations arrivant sur la plaque  $I_{plaque}$  en utilisant le rapport trouvé précédemment, soit :

$$I_{plaque} = R \cdot I_{ref} \quad (3.2)$$

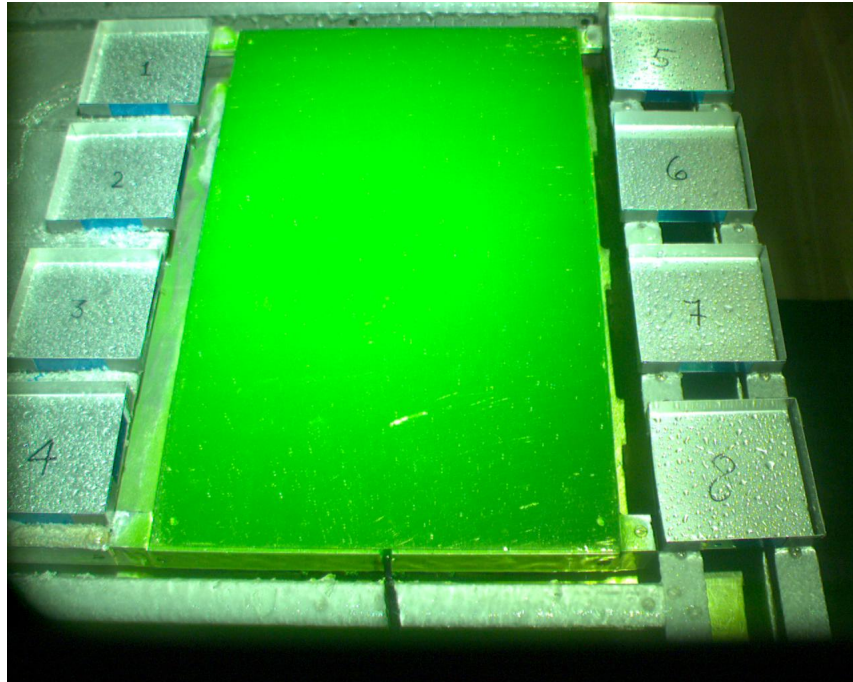


Figure 3.3: Disposition de la plaque et des réceptacles de références pour l'essai avec le fluide antigivre.

### 3.1.3 Essais d'endurance à la neige (SNW)

Pour ces essais, des plaques d'aluminium 500mm par 300mm avec une épaisseur de 3,2mm sont utilisées. Celles-ci sont inclinées de  $(10,0 \pm 0,2)^\circ$  par rapport à l'horizontale. De la neige est remplie à l'intérieur du réceptacle d'un appareil de distribution de neige située au-dessus de la plaque (Figure 3.4). Ce dispositif se déplace dans le plan horizontal de façon à obtenir l'intensité de neige ciblée sur la plaque d'essai.

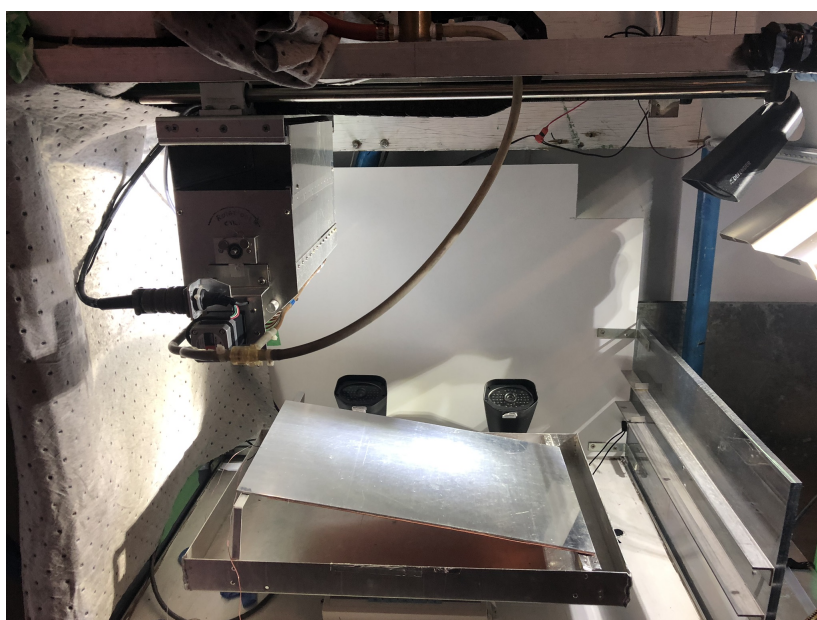


Figure 3.4: Montage expérimental montrant la machine à neige au-dessus de la plaque d'essai.

La neige à l'intérieur de la machine est constamment brassée par un système de trois lames en rotation. Elle tombe dans un cylindre de 32mm de diamètre dans lequel des trous ont été percés. La rotation de ce cylindre entraîne la dispersion de la neige sur la plaque. La vitesse de rotation du cylindre est contrôlée par ordinateur de manière à obtenir l'intensité de précipitations requise. La plaque se trouve à une distance de 336mm du point le plus bas de la machine d'où tombe la neige.

La chambre climatique est maintenue à une température ambiante entre  $-25^\circ\text{C}$  et  $0^\circ\text{C}$ , en fonction

de l'essai à réaliser et l'humidité relative est d'au moins 40%. L'intensité moyenne des précipitations se situe entre  $(3 \pm 0,2) \frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$  et  $(25 \pm 1,5) \frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$ , selon la méthode utilisée.

La neige artificielle utilisée pour l'essai est préalablement produite dans une chambre climatique en utilisant un système de gicleurs et en utilisant de l'eau déminéralisée. Pour y arriver, la température de l'air de la chambre est maintenue entre  $-25^{\circ}\text{C}$  et  $-15^{\circ}\text{C}$  alors que les gicleurs produisent des gouttelettes de diamètre volumétrique médian de  $(22 \pm 3) \mu\text{m}$  en utilisant une pression d'air de 260kPa. Les gouttelettes produites par celui-ci sont surrefroidies au contact de l'air de la chambre et gèlent au contact du sol [5]. Au début de l'essai, cette neige est chargée dans la machine à neige.

Une quantité d'un litre de fluide antigivre est versé sur la plaque de façon à la recouvrir entièrement. Ensuite, les précipitations démarrent, ce qui marque le début de l'essai d'endurance ( $t = 0$ ).

Les essais de neige sont des tests d'endurance au temps et l'échec est déclaré lorsque 30% de la plaque est recouverte de neige blanche. La neige blanche est la neige qui n'est pas absorbée dans le fluide gardant ainsi sa couleur blanche. La figure 3.5 présente les zones de neige blanche pour un essai de neige typique. Toute la neige changeant de couleur parce qu'elle est en train d'être diluée par le fluide ne doit pas être considérée pour l'évaluation du critère d'échec.



(a) Image originale.



(b) Même image avec la neige blanche hachurée.

Figure 3.5: Interprétation de la neige blanche dans un essai SNW.

Dans un essai de neige, l'échec peut être causé par deux processus.

Dans un premier cas, l'échec survient lorsque le fluide est dilué suffisamment pour perdre de sa viscosité. À ce moment, il va s'écouler vers le bas de la plaque faisant en sorte qu'il y aura de moins en moins de fluide en haut de la plaque. Ce processus est nommé échec par dilution (Dilution failure).

Dans ce cas, la neige commence à s'accumuler du haut vers le bas de la plaque (Figure 3.6).



Figure 3.6: Échec par dilution d'un essai de neige.

Dans un deuxième cas, l'échec survient lorsque le fluide n'est pas dilué par la neige. Ce processus est nommé échec par pontage de neige (Snow-bridging failure). Dans ce cas, le débit de neige incident étant plus grand que le débit d'absorption de celle-ci par le fluide, la neige commence à s'accumuler sur toute la surface de la plaque [5].

Lorsque le critère d'échec est observé, le technicien note le temps écoulé depuis le début de l'essai. Ce temps correspond au temps d'endurance du fluide antigivre pour les conditions expérimentales de l'essai.

## 3.2 Description du montage

Afin de faciliter la détection automatique du givre, les chambres climatiques doivent être configurées de façon à permettre la production d'images de qualité. Deux facteurs sont particulièrement importants,

soient l'uniformité de l'éclairage et la position relative de la caméra par rapport à la plaque.

Il est important que la plaque soit éclairée de manière uniforme puisque, sommairement, la détection se fait en évaluant la différence d'une région à l'autre pour différencier le givre du fluide. Si une démarcation artificielle est causée par l'éclairage, celle-ci pourrait être interprétée comme une frontière entre le fluide et le givre. De plus, l'uniformité de l'éclairage assure que les seuils de variations entre le fluide et le givre choisis par l'algorithme soient représentatifs.

Un éclairage direct a été utilisé. Dépendamment de la chambre utilisée, l'éclairage est positionné au plafond de la chambre ou sur un trépied près de l'appareil photo.

Idéalement, l'appareil photo devrait être positionné orthogonalement à la plaque de manière à calculer l'aire givrée sans effet de perspective. En pratique, il n'est pas possible d'avoir ce positionnement de par la géométrie de la chambre climatique et afin de préserver l'uniformité des précipitations sur la plaque pour assurer la validité de l'essai. Le programme MATLAB effectuera une transformation de l'image pour minimiser l'impact de l'alignement imparfait.

L'appareil photo utilisé est une Basler acA1300-200uc muni d'une lentille Kowa de distance focale 8mm (figure 3.7). Celui-ci est branché à un ordinateur par un câble USB3 pour la transmission des images en temps réel qu'il prend à intervalle de 20 secondes. Cet appareil produit des photos en couleur de format 1280x1024 pixels. Il est placé de façon à ce que la lentille soit le plus possible à l'abri des précipitations.





Figure 3.7: Basler acA1300-200uc avec une lentille Kowa 8mm.

### 3.2.1 Essais d'endurance au brouillard givrant (WSET)

La chambre climatique 3M du LIMA est utilisée pour les essais au brouillard givrant. Celle-ci mesure 3,3m de haut, 3,76m de long et 1,93m de large. Une fenêtre triple verre permet d'observer l'expérimentation de l'extérieur.

Un gicleur placé à 1,3m au-dessus de la plaque et centrée sur celle-ci permet une distribution uniforme des précipitations en oscillant de  $\pm 30^\circ$  à une fréquence de 3 cycles par minute [10].

Pour un essai, trois plaques de 30cm par 10cm avec du fluide sont disposées sur la table d'essai. Trois autres plaques sans fluide sont également sur la table. Sur chacune d'elles se trouvent trois plus petites plaques de 10cm par 10cm utilisées pour vérifier l'intensité et l'uniformité des précipitations

(figure 3.8).

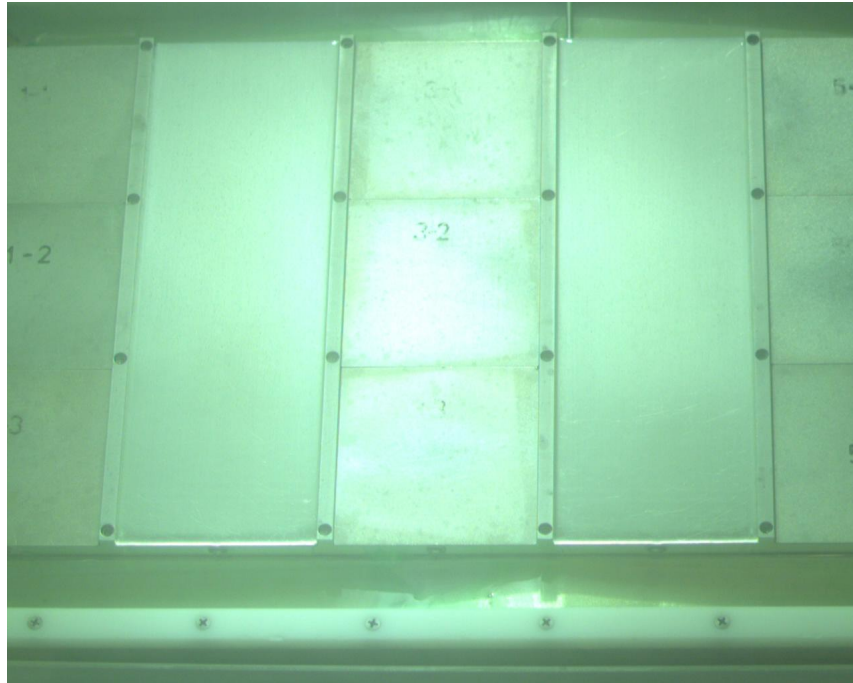


Figure 3.8: Détail du montage pour un essai WSET.

### 3.2.2 Essai d'endurance à la pluie verglaçante légère (LZR)

La chambre climatique 9M du LIMA (figure 3.9) est utilisée pour les essais de pluie verglaçante légère. Celle-ci mesure 9,10m de haut, 5,50m de long et 3,50m de large. Une fenêtre triple verre de  $90 \times 155$ cm permet d'observer l'expérimentation de l'extérieur. Cette chambre climatique permet un contrôle de la température de l'air entre  $-32,0^{\circ}\text{C}$  et  $0,0^{\circ}\text{C}$  avec une précision de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . La distance entre la plaque et la caméra est de 70cm. L'éclairage est fixé au plafond.



Figure 3.9: Chambre climatique 9M du LIMA utilisée pour les essais de pluie verglaçante légère.

### 3.2.3 Essais d'endurance à la neige (SNW)

La chambre climatique 9M du LIMA (figure 3.9) décrite ci-haut est utilisée pour les essais de neige. La distance entre la plaque et la caméra est de 70cm (figure 3.10). L'éclairage est fixé sur un trépied à proximité de l'appareil photo.

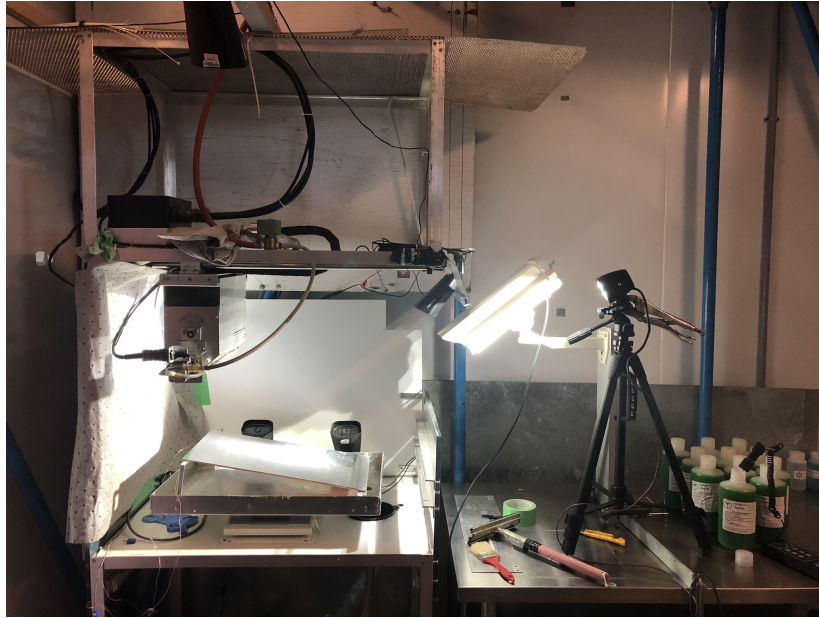


Figure 3.10: Montage avant le début de l'essai.

Afin d'obtenir une bonne corrélation entre les temps d'endurance obtenus avec de la neige réelle (à l'extérieur) et ceux obtenus en laboratoire la température de la plaque est contrôlée par un élément chauffant selon l'équation empirique suivante [5] :

$$P_T = T_T - 0.065I_I - 0.5 \quad (3.3)$$

où

$P_T$  : température de la plaque ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_T$  : température ciblée pour l'essai ( $^{\circ}\text{C}$ )

$I_I$  : intensité des précipitations ( $\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$ )

Pour les essais de neige, l'appareil à neige bouge afin de distribuer la neige le plus uniformément pos-

sible sur la plaque (figure 3.11) ce qui fait que l'éclairage de celle-ci change avec le temps, compliquant la reconnaissance du givre.

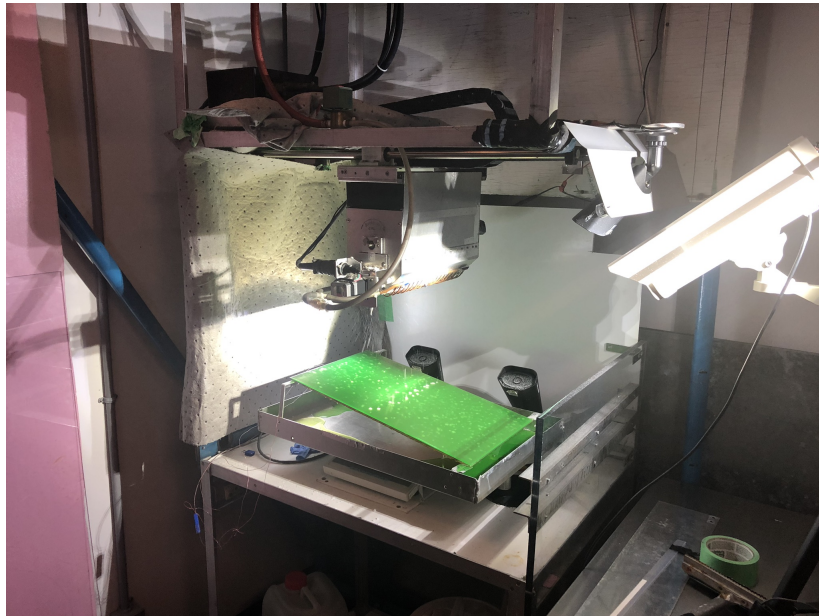


Figure 3.11: Pendant l'essai. Le fluide antigivre (vert) est sur la plaque. De la neige est perceptible sur la plaque.

### 3.3 Paramètres expérimentaux

Dans le cadre de ce projet, plusieurs essais WSET, LZR et SNW ont été réalisés. Chacun de ces types d'essais a été réalisé avec différents fluides et différentes conditions expérimentales. Des photos ont été prises à tous les 20 secondes lors de 2 essais au brouillard givrant, 7 essais à la pluie verglaçante légère et 7 essais de neige. Toutefois, des problèmes lors de la prise de mesures font en sorte qu'un des essais de pluie verglaçante et un des essais de neige sont inutilisables.

Pour tous les essais, un technicien était également sur place afin de s'assurer que l'essai se fait dans les règles de l'art et d'évaluer visuellement le moment auquel le critère d'échec est observé. Les temps d'endurance ainsi déterminés sont rapportés aux chapitre suivant.

Les essais au brouillard givrant ont été fait conformément à la norme AS5901 [13] décrite plus haut selon les paramètres expérimentaux du Tableau 3.3.

Tableau 3.3: Paramètres expérimentaux pour les essais d'endurance au brouillard givrant

Nom de l'essai	Type	Intensité moyenne $\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$	Température air °C	Température plaques °C
WS8233	II anti-icing	5,07	$-5,1 \pm 0,1$	$-5,1 \pm 0,1$
WS8234	II anti-icing	4,99	$-5,0 \pm 0,1$	$-5,0 \pm 0,1$

Quant à eux, les essais à la pluie verglaçante légère ont été fait conformément à la norme ARP5485 [5] décrite plus haut selon les paramètres expérimentaux du Tableau 3.4.

Tableau 3.4: Paramètres expérimentaux pour les essais d'endurance de pluie verglaçante légère

Nom de l'essai	Fluide	Type	Intensité $\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$	Température °C
LZRB001	L170	IV anti-icing	$26.8 \pm 2.8$	-3
LZRB002	L122	IV anti-icing	$24.9 \pm 2.3$	-3
LZRB003	L188	IV anti-icing	$24.7 \pm 2.2$	-3
LZRB005	L403	IV anti-icing	$26.1 \pm 2.0$	-3
LZRB006	L122	IV anti-icing	$22.2 \pm 2.1$	-3
LZRB007	L404	IV anti-icing	$32.3 \pm 3.0$	-3

Finalement, les essais de neige ont été fait conformément à la norme ARP5485 [5] décrite plus haut selon les paramètres expérimentaux du Tableau 3.5.

Tableau 3.5: Paramètres expérimentaux pour les essais d'endurance de neige

Nom de l'essai	Fluide	Type	Intensité $\frac{\text{g}}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$	Température °C
SNWH473	L170	IV anti-icing	10, 1	$-14, 1 \pm 0, 2$
SNWH474	L170	IV anti-icing	10, 1	$-14, 0 \pm 0, 3$
SNWH475	L170	IV anti-icing	10, 3	$-14, 1 \pm 0, 2$
SNWH476	L170	IV anti-icing	23, 9	$-14, 1 \pm 0, 2$
SNWH477	L170	IV anti-icing	24, 1	$-14, 1 \pm 0, 2$
SNWH478	L170	IV anti-icing	24, 7	$-14, 1 \pm 0, 2$
SNWH479	L170	IV anti-icing	25	$-14, 1 \pm 0, 1$

## **Chapitre 4**

### **Résultats expérimentaux**

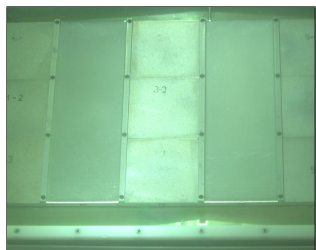


Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus de la manière décrite au chapitre précédent. Premièrement, des photographies illustrant l'évolution dans le temps d'essais de brouillard givrant, de pluie verglaçante légère et de neige typiques sont présentés. Puis, les temps d'endurance déterminés par trois techniciens scientifiques à partir des photos des essais et celui déterminé par un technicien présent lors de l'essai sont donnés pour tous les essais réalisés. Finalement, des photos du moment de l'échec sont fournies.

## **4.1 Essais d'endurance**

Des photos ont été prises pour deux essais d'endurance au brouillard givrant, six à la pluie verglaçante légère utilisant des fluides anti-givres différents et pour sept essais d'endurance à la neige pour un fluide dans différentes conditions climatiques. Pour chacun de ces essais, des photos dans le spectre visible sont enregistrées par un appareil photo à l'intérieur de la chambre climatique à toutes les 20 secondes et transmises à un ordinateur à l'extérieur pour le traitement des données. Une attention particulière a été portée au positionnement de l'appareil photo, au temps d'exposition utilisé par celui-ci, ainsi qu'à l'éclairage pour tenter d'avoir une certaine uniformité entre les différents essais. Cependant, l'inspection visuelle des images révèle tout de même des disparités au niveau de l'uniformité et de l'intensité de l'éclairage.

Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 présentent respectivement le montage ainsi que l'évolution dans le temps d'essais typiques de brouillard givrant, de pluie verglaçante légère et de neige, respectivement.



(a) Montage



(b) 13.3 min



(c) 26.6 min



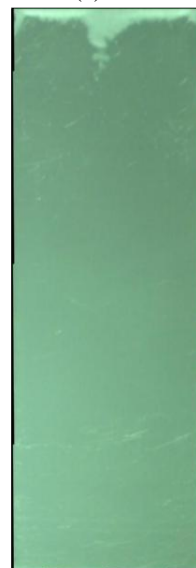
(d) 40 min



(e) 53.3 min



(f) 66.6 min

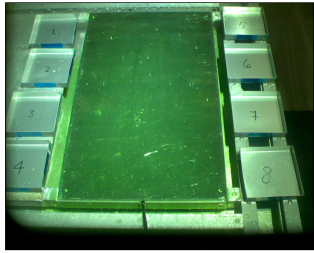


(g) 80 min

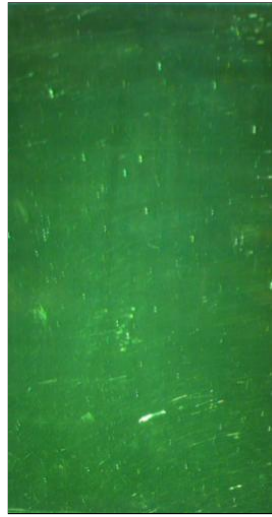


(h) 93.3 min

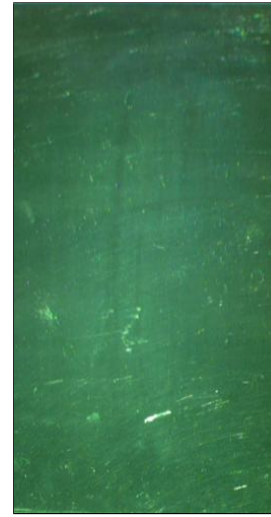
Figure 4.1: Photographies d'un essai de brouillard givrant typique (WS8233).



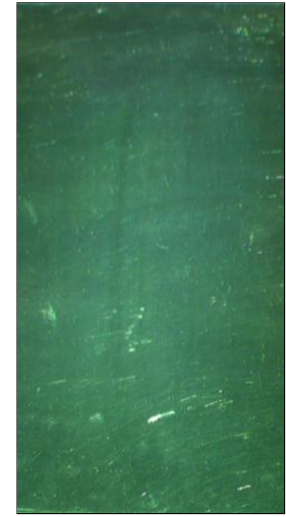
(a) Montage



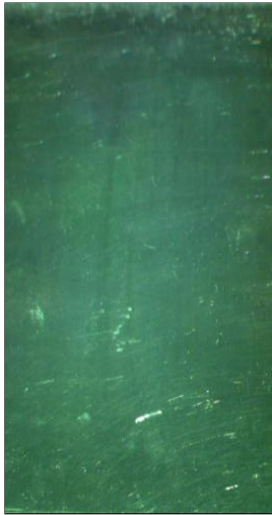
(b) 0 min



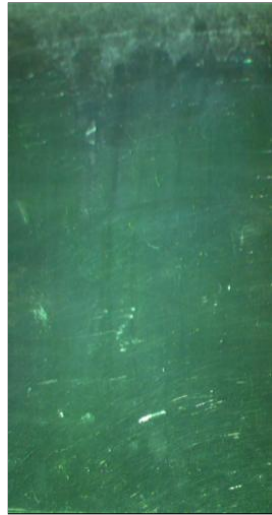
(c) 10 min



(d) 20 min



(e) 30 min



(f) 40 min

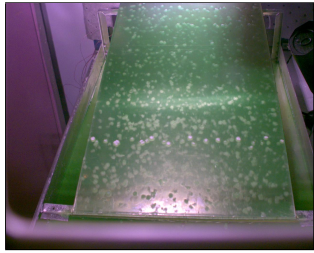


(g) 50 min



(h) 60 min

Figure 4.2: Photographies d'un essai de pluie verglaçante légère typique (LZRB002).



(a) Montage



(b) 0 min



(c) 10 min



(d) 20 min



(e) 30 min



(f) 40 min



(g) 50 min



(h) 60 min

Figure 4.3: Photographies d'un essai de neige typique (SNWH475).

## 4.2 Temps d'endurance

Les tableaux suivants présentent les temps d'endurance déterminés de deux façon différentes.

Premièrement, le temps d'endurance a été déterminé au moment de l'essai par le technicien qui réalisait celui-ci (Tech Présent).

Deuxièmement, trois techniciens du LIMA ont déterminé les temps d'endurance après l'essai en utilisant les photos (Tech 1, Tech 2 et Tech 3). Ces techniciens ont travaillé de façon indépendante. Une moyenne des temps obtenus en utilisant les images est calculée ainsi que la déviation standard afin de comparer avec les temps d'endurance trouvés par les algorithmes.

Tableau 4.1: First Ice Event (FIE) pour les essais d'endurance au brouillard givrant

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech 1	Tech 2	Tech 3	Moyenne	Dév STD
	min	min	min	min	min	min
WS8233	85	93	72	80	82	11
WS8234	8	14	13	12	13	1

Tableau 4.2: Temps d'endurance pour les essais d'endurance de pluie verglaçante légère

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech 1	Tech 2	Tech 3	Moyenne	Dév STD
	min	min	min	min	min	min
LZRB001	60	50	51	51	51	1
LZRB002	70	56	59	58	58	2
LZRB003	152	122	123	123	123	1
LZRB004	74	84	84	81	83	2
LZRB006	115	114	114	114	114	0
LZRB007	61	55	56	73	61	10

Tableau 4.3: Temps d'endurance pour les essais d'endurance de neige

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech 1	Tech 2	Tech 3	Moyenne	Dév STD
	min	min	min	min	min	min
SNWH473	72	80	74	73	76	4
SNWH475	71	67	66	67	67	1
SNWH476	29	23	24	29	25	3
SNWH477	29	33	32	41	35	5
SNWH478	32	38	37	46	40	5
SNWH479	30	34	33	44	37	6

### 4.3 Photos de l'échec

Cette section présente les photos au temps d'endurance moyen déterminé par les trois techniciens scientifiques à partir des photos. De plus, des photos des temps d'endurance le plus court et le plus long sont données.

Pour les essais de brouillard givrant (figures 4.4 et 4.5), la différence visuelle est évidente entre le temps d'endurance le plus court et le plus long trouvés par les techniciens.



(a) Temps moyen d'endurance: 82 minutes.



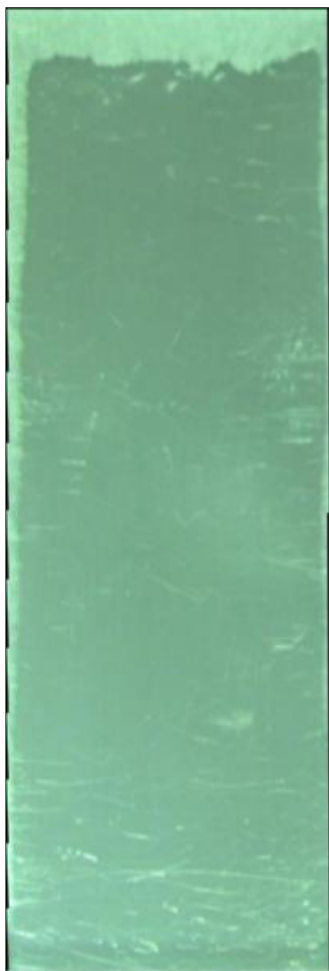
(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 72 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 93 minutes.

Figure 4.4: WS8233.





(a) Temps moyen d'endurance: 13 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance:  
12 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps  
d'endurance: 14 minutes.

Figure 4.5: WS8234.



Pour les essais de pluie verglaçante légères (figure 4.6 à 4.11), même lorsque les techniciens trouvent des temps d'endurance différents, l'aspect visuel de la plaque est semblable sauf pour l'essai LZRB007 (figure 4.11).



(a) Temps moyen d'endurance: 51 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 50 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 51 minutes.

Figure 4.6: LZRB001.



(a) Temps moyen d'endurance: 58 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 56 minutes.

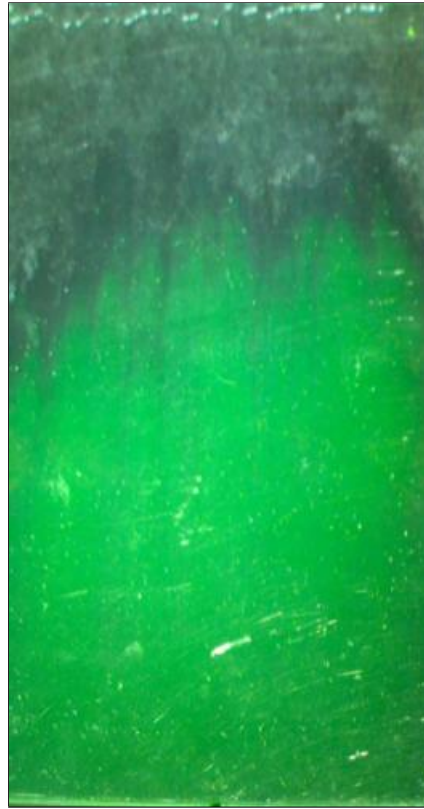


(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 59 minutes.

Figure 4.7: LZRB002.



(a) Temps moyen d'endurance: 123 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 122 minutes.

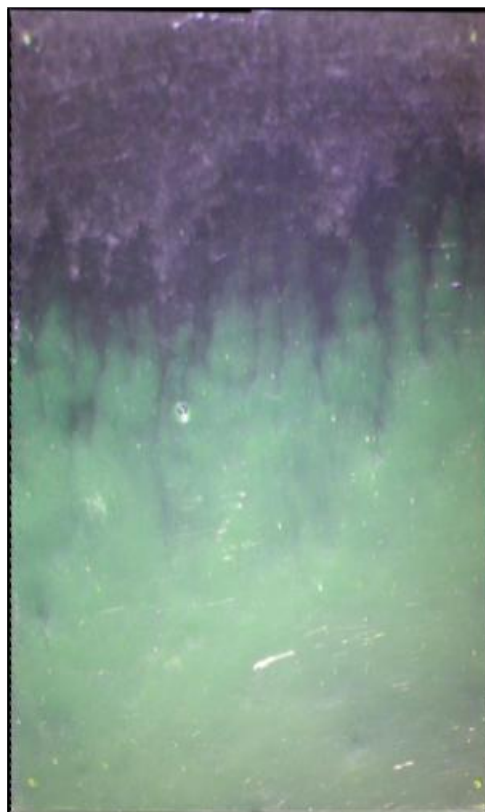


(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 123 minutes.

Figure 4.8: LZRB003.



(a) Temps moyen d'endurance: 83 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance:  
81 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps  
d'endurance: 84 minutes.

Figure 4.9: LZRB004.





(a) Temps moyen d'endurance: 114 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 114 minutes.

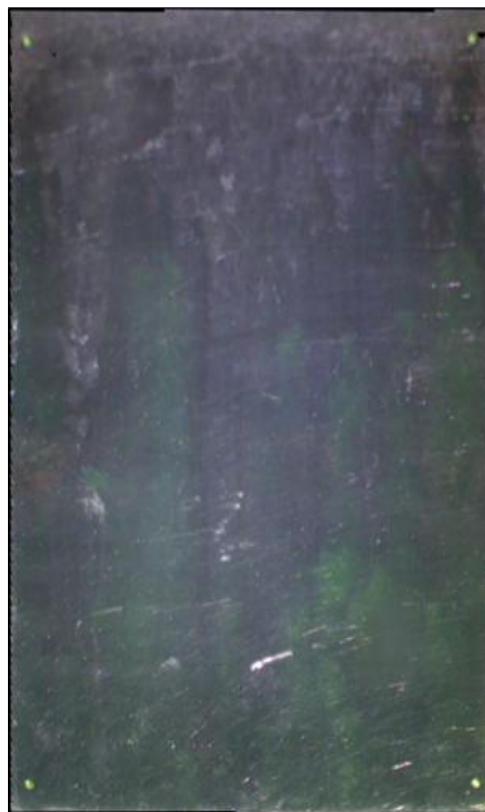


(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 114 minutes.

Figure 4.10: LZRB006.



(a) Temps moyen d'endurance: 61 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 55 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 73 minutes.

Figure 4.11: LZRB007.

Pour les essais de neige (figure 4.12 à 4.17), la différence visuelle est évidente entre le temps d'endurance le plus court et le plus long trouvés par les techniciens.





(a) Temps moyen d'endurance: 76 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 73 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 80 minutes.

Figure 4.12: SNWH473.



(a) Temps moyen d'endurance: 67 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 66 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 67 minutes.

Figure 4.13: SNWH475.



(a) Temps moyen d'endurance: 25 minutes.



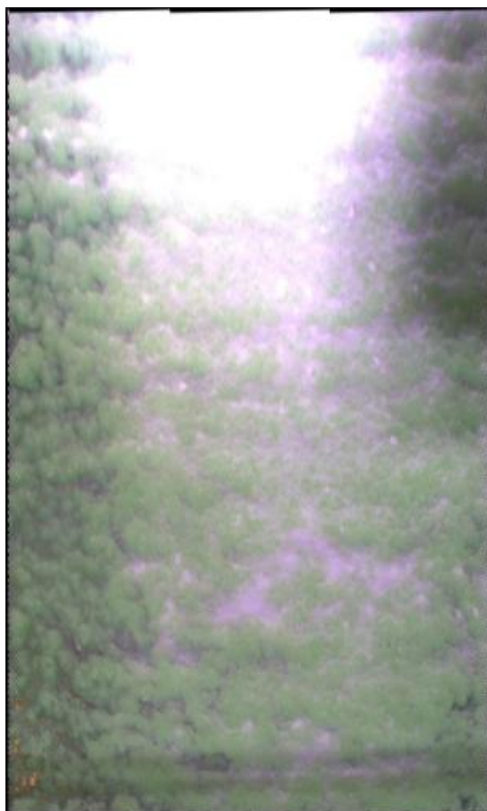
(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 23 minutes.



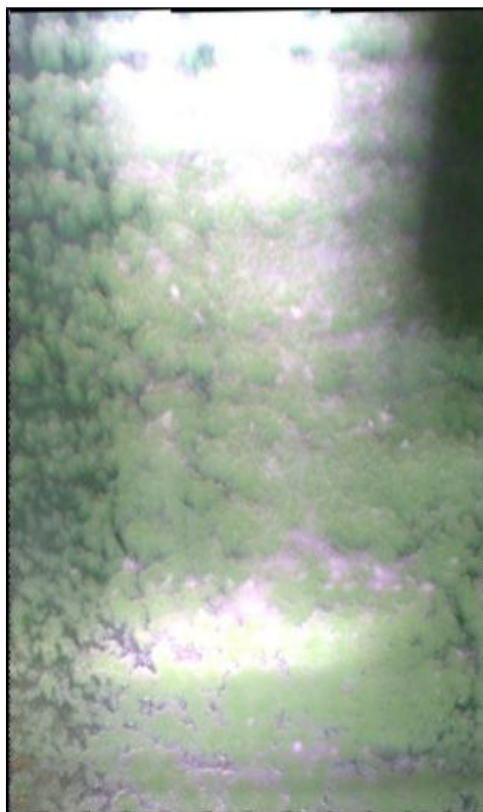
(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 29 minutes.

Figure 4.14: SNWH476.

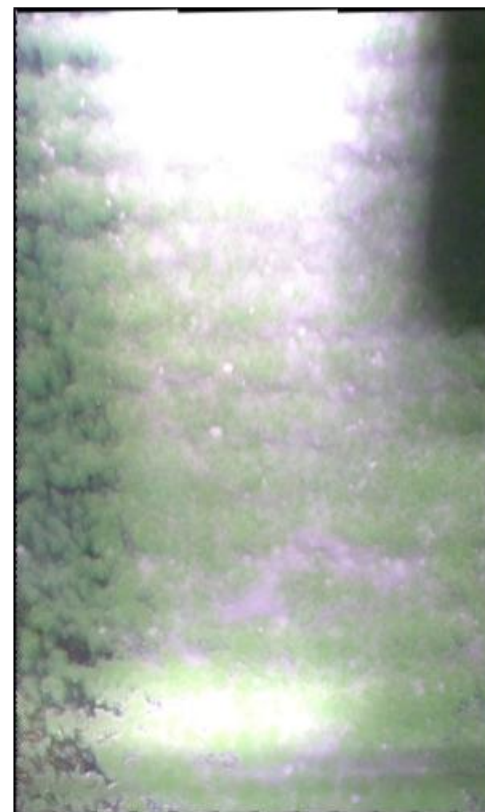




(a) Temps moyen d'endurance: 35 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 32 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 41 minutes.

Figure 4.15: SNWH477.



(a) Temps moyen d'endurance: 40 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 37 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 46 minutes.

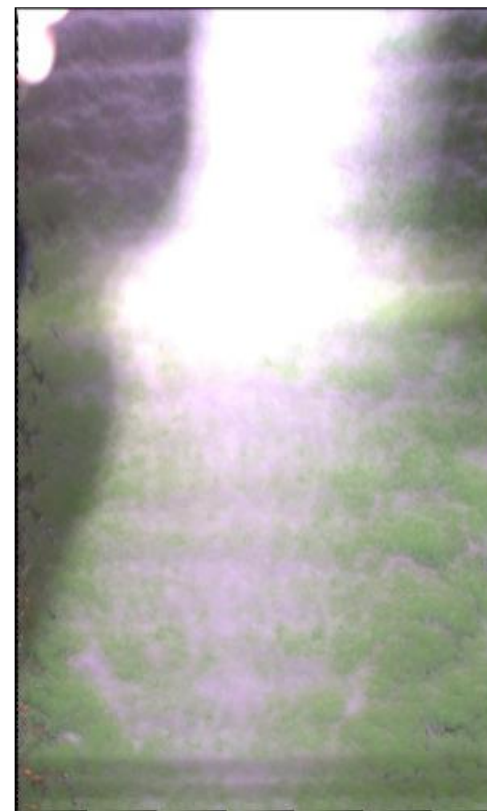
Figure 4.16: SNWH478.



(a) Temps moyen d'endurance: 37 minutes.



(b) Valeur inférieure du temps d'endurance: 33 minutes.



(c) Valeur supérieure du temps d'endurance: 44 minutes.

Figure 4.17: SNWH479.

## **Chapitre 5**

### **Méthodes de détection**

Ce chapitre expose les éléments théoriques permettant de reconnaître le givre automatiquement par traitement d'images.

Pour commencer, la façon dont les images sont représentées dans MATLAB est discutée. Ensuite, l'histogramme de l'image et l'algorithme d'Otsu pour binariser une image sont abordés. Suit une exposition de l'ajustement gamma utilisé pour la transformation non linéaire des couleurs. Puis, une explication des convolutions discrètes est donnée afin de comprendre comment des filtres peuvent être appliqués aux images discrètes. L'effet et la façon dont fonctionnent différents filtres utiles pour la détection du givre tels que les filtres gaussien, de Canny, de Kalman et homomorphique sont expliqués. Finalement, les algorithmes pour la reconnaissance du givre dans les essais WSET, LZR et SNW ainsi que l'algorithme pour la segmentation automatisée de la plaque sont détaillés.

## 5.1 Représentation numérique des images dans MATLAB

Une image binaire (noir et blanc) est représentée numériquement comme une matrice  $\mathbf{I}$  ayant un nombre de colonnes  $n$  égal au nombre de pixels horizontaux de l'image et un nombre de ligne  $m$  égale au nombre de pixels verticaux de celle-ci. Si un pixel est blanc, l'élément de la matrice correspondant à ce pixel est égal à 1 alors qu'il est égal à 0 s'il est noir.

$$I_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le pixel de la } i\text{ème colonne et de la } j\text{ème ligne est blanc} \\ 0 & \text{si le pixel de la } i\text{ème colonne et de la } j\text{ème ligne est noir} \end{cases} \quad (5.1)$$

Des images en dégradés de gris (gray level) peuvent être représentée en donnant une valeur entière à chaque pixel entre 0 et 255, 0 étant noir et 255 étant blanc. Celles-ci peuvent également être normalisée en utilisant des valeurs réelles entre 0 et 1 pour les pixels.



Les images utilisées pour ce projet sont en couleurs (Rouge Vert Bleue). Les couleurs rouges, verte et bleue sont représentées numériquement dans trois matrices différentes combinées dans une matrice multidimensionnelle  $I_{ijk}$ . Le premier indice ( $i$ ) d'une telle matrice étant la ligne, le deuxième ( $j$ ) la colonne et le troisième ( $k$ ) la couleur. L'intensité des trois couleurs est représentée par une valeur numérique entière entre 0 et 255, 0 étant l'absence et 255 la saturation de celle-ci.

## 5.2 Histogramme de l'image

L'histogramme d'une image est un graphique de la fréquence relative des valeurs des pixels dans celle-ci. Étudier l'histogramme d'une image permet de visualiser les différentes plages de couleurs présentes sur une image pour représenter les différents objets. Ainsi, il est parfois possible d'identifier une séparation nette entre les couleurs des objets à identifier et le reste de l'image.

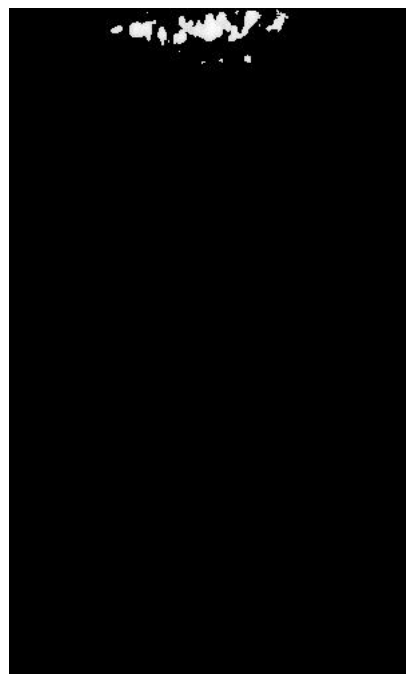
Dans une image idéale, les pixels givrés auraient une plage de valeurs différente de celle des pixels de la plaque. Il serait alors possible d'utiliser l'histogramme pour segmenter l'image afin de détecter la partie givrée de la plaque.

La figure 5.1 illustre cette méthode. Un filtre de Kalman est appliqué à l'image originale afin de réduire les réflexions (voir section sur le filtre de Kalman ci-dessous). L'image résultante est en dégradés de gris. Ensuite, l'image est binarisée à l'aide de l'histogramme en utilisant un seuil de 220. Finalement, tous les pixels reconnus comme givrés sont ajoutés à ceux reconnus dans les images précédentes pour former une image cumulative.

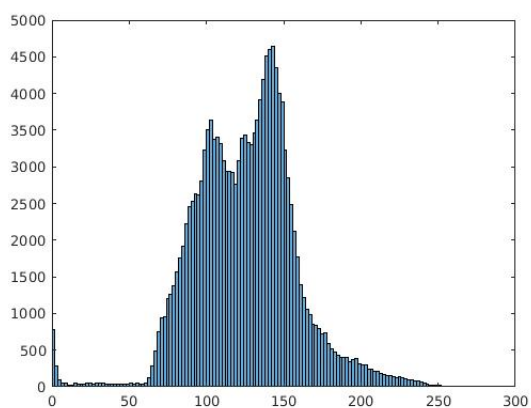
Par exemple, une fois que le bruit de l'image est réduit, la neige blanche dans les essais de neige peut facilement être segmentée en utilisant cette méthode (figure 5.1).



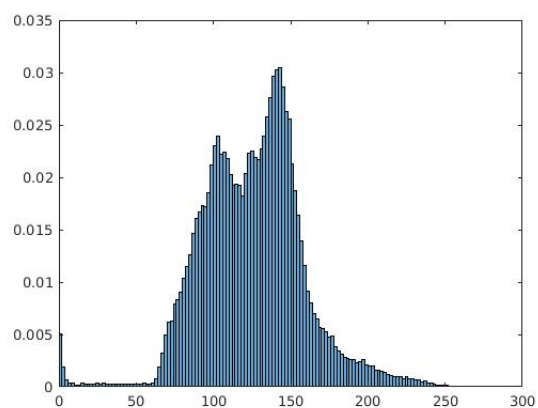
(a) Image originale de la plaque avec neige.



(b) Image segmentée avec une coupure à 220.



(c) Histogramme de l'image originale.



(d) Histogramme normalisé de l'image originale.

Figure 5.1: Détection du givre et histogramme pour un essai de neige.

Cependant, l'aspect du givre change avec le temps et certaines images peuvent avoir différentes régions givrées ayant des apparences différentes. Des méthodes plus sophistiquées que la simple détermination d'un seuil à partir de l'histogramme sont alors nécessaires notamment pour les essais WSET et LZR.

### 5.3 Algorithme d'Otsu

La méthode d'Otsu détermine un seuil approprié pour transformer une image en gris en format binaire. L'algorithme choisit un seuil  $T$  pour séparer les pixels en deux classes, 0 et 1, à partir de l'histogramme normalisé de l'image (figure 5.1d). Cet histogramme normalisé représente la fonction de densité  $p(i)$  donnant la probabilité qu'un pixel ait une valeur  $i$ .

Soient  $\mu_0(T)$  et  $\mu_1(T)$  les valeurs moyennes des classes 0 et 1 pour un seuil  $T$ . De plus, soit  $\mu$  la valeur moyenne de l'histogramme complet.

L'algorithme choisi le seuil  $T$  maximisant la variance interclasse  $\sigma^2$  définie comme [14] :

$$\sigma^2(T) = \omega_0(T)(\mu_0(T) - \mu)^2 + \omega_1(T)(\mu_1(T) - \mu)^2 \quad (5.2)$$

où  $\omega_0(T)$  et  $\omega_1(T)$  sont les probabilités qu'un pixel aie une valeur dans la classe 0 et 1 pour le seuil  $T$ , c'est-à-dire :

$$\omega_0(T) = \sum_{i=0}^{T-1} p(i)$$

et

$$\omega_1(T) = 1 - \omega_0(T)$$

L'algorithme calcul  $\sigma^2(T)$  pour chaque valeur de  $T$  entre 0 et 255. Ensuite, la valeur de  $T$  maximisant  $\sigma^2(T)$  est conservée comme seuil pour segmenter l'image. Les pixels ayant une valeur inférieure

à  $T$  sont mis à 0 et les autres à 1.

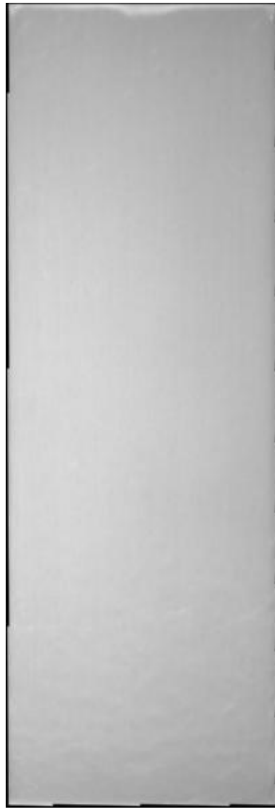
## 5.4 Ajustement gamma

L'ajustement gamma permet de transformer la valeur des pixels d'une image à l'aide d'une loi exponentielle [14]. La valeur modifiée  $I'_{ij}$  d'un pixel  $I_{ij}$  est donnée par :

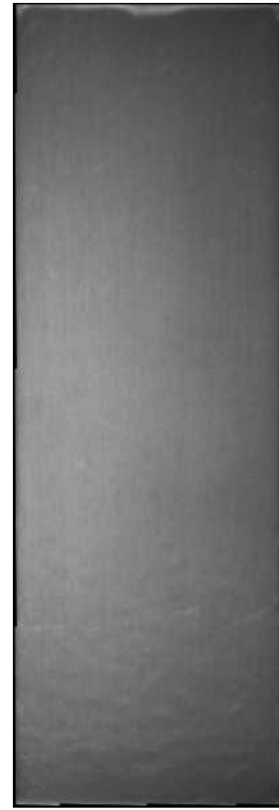
$$I'_{ij} = AI_{ij}^{\gamma} \quad (5.3)$$

où  $A$  est une constante.

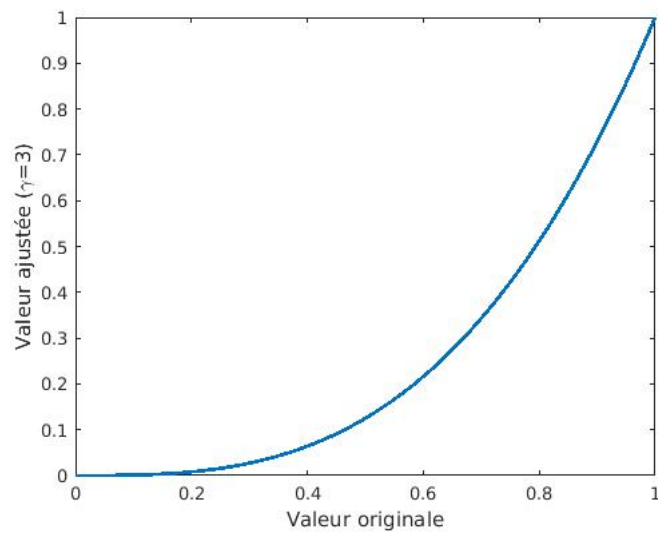
La figure 5.2a présente une photo pour laquelle la plaque et le givre sont très brillants. Après l'ajustement gamma, la partie la plus brillante (le givre) a gardé son apparence alors que le reste de la plaque s'est assombri (figure 5.2b). La loi utilisée pour obtenir cette image,  $I'_{ij} = I_{ij}^3$  est tracée à la figure 5.2c.



(a) Image originale.



(b) Image avec ajustement gamma ( $\gamma = 3$ ).



(c) Valeur ajustée en fonction de la valeur originale ( $\gamma = 3$ ).

Figure 5.2: Effet de l'ajustement gamma.

## 5.5 Convolutions discrètes

Les convolutions discrètes sont utilisées pour effectuer les opérations sur les images [16]. Pour ce faire, l'opération est représentée par un noyau, c'est-à-dire une matrice dont les dimensions sont inférieures à celles de l'image. Les éléments de cette matrice correspondent aux poids d'une combinaison linéaire à effectuer sur une sous-matrice de l'image de même dimension que le noyau afin de modifier la valeur de l'élément central de celle-ci.

La convolution discrète désigne la modification des valeurs des éléments centraux de chacune des sous-matrices de mêmes dimensions que celles du noyau en déplaçant le noyau de façon à parcourir toutes ces sous-matrices.

Soit un noyau  $N$  de dimensions  $n \times n$  ( $n$  impair) et une image en dégradé de gris représentée par la matrice  $I$ . L'élément  $ij$  de la matrice image modifiée par ce noyau est donné par :

$$M_{ij} = \sum_{k=-n}^n \sum_{l=-n}^n N_{i-k,j-l} I_{kl} \quad (5.4)$$

Les opérations à appliquer à l'image sont effectuées en choisissant un noyau approprié. Par exemple, pour calculer le laplacien d'une fonction continue, l'équation 5.5 serait utilisée.

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (5.5)$$

Pour effectuer la même opération sur une image  $I$  (matrice aux valeurs discrètes), l'approximation

numérique de l'équation 5.5 serait utilisée pour calculer le résultat pour l'élément  $ij$  :

$$M_{ij} = I_{i+1,j} + I_{i-1,j} + I_{i,j+1} + I_{i,j-1} - 4I_{ij} \quad (5.6)$$

Cette opération peut être représentée par le noyau suivant :

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

de sorte que la convolution de celui-ci avec la matrice image s'écrit comme suit :

$$\mathbf{M} = \mathbf{N} * \mathbf{I} \quad (5.8)$$

Le filtre Laplacien peut être utilisé pour trouver les contours dans une image. Les contours ainsi trouvés sont précisément localisés, c'est-à-dire que la frontière est mince. Cependant, le filtre Laplacien est sensible au bruit.

## 5.6 Filtre gaussien

Le filtre gaussien est un noyau carré discret qui est une approximation de la fonction gaussienne (figure 5.3) à symétrie radiale avec une certaine déviation standard  $\sigma$ , se définissant comme suit [14]:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.9)$$

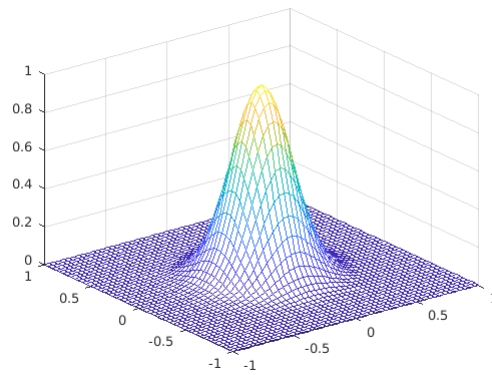


Figure 5.3: Fonction de Gauss.

Les valeurs utilisées dépendent des dimensions du noyau et de la déviation standard choisie.

Le filtre gaussien est utilisé pour introduire du flou dans l'image afin d'enlever des détails ou du bruit dans celle-ci (figure 5.4).





(a) Image originale.



(b) Image filtrée par un filtre gaussien ( $\sigma = 2$ ).

Figure 5.4: Résultat de l'application d'un filtre gaussien.

## 5.7 Contours

La variation rapide d'une couleur peut servir à l'identification des frontières entre les différentes zones d'une image. Les opérateurs différentiels du premier et du deuxième ordre sont utilisés pour identifier les ensembles de pixels autour desquels il y a une discontinuité [14]. Ces opérateurs différentiels sont implémentés numériquement tel qu'illustré, par exemple, par l'équation 5.6.

Ces contours peuvent être utilisés pour segmenter la plaque ou pour identifier une partie givrée de celle-ci. En effet, une plaque sur laquelle a été versée un fluide antigivre est assez lisse, toutefois, lorsque du givre se forme, des discontinuités apparaissent permettant d'identifier les zones givrées.

## 5.8 Détecteur de Canny

Le détecteur de Canny [15] est un algorithme encore plus sophistiqué que la simple application de filtres à bases d'opérateurs différentiels pour la détection des contours dans une image (figure 5.5).

Canny avait trois objectifs lors du développement de ce filtre. Premièrement, il avait comme préoccupation de minimiser l'erreur, c'est-à-dire de détecter le plus de contours possible sans pour autant avoir de faux positifs. Ensuite, il souhaitait que le filtre soit précis, c'est-à-dire qu'il minimise la distance entre les contours détectés et les contours réels. Finalement, la frontière doit être précisément localisée, c'est-à-dire que seuls les maximum locaux seront gardés par le filtre.

L'algorithme consiste en cinq étapes [16] :

1. Le bruit dans l'image est réduit par l'application d'un filtre gaussien de déviation standard  $\sigma$ . Différentes déviations standards permettent de trouver les contours d'éléments à différentes échelles.
2. Pour chacun des points de l'image, les gradients locaux vertical et horizontal sont calculés puis additionnés en valeurs absolues :

$$E(x, y) = |G_x(x, y)| + |G_y(x, y)| \quad (5.10)$$

Pour un point  $(x, y)$  donné, plus  $E(x, y)$  est grand plus la variation locale d'intensité est grande.

3. Pour chacun des points de l'image, l'orientation du contour est calculé :

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{G_y}{G_x} \right) \quad (5.11)$$

Cet angle est arrondi à une valeur possible pour une image numérique, c'est-à-dire que

$$\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$$

.

4. Le contour est parcouru dans la direction  $\theta$  et les maximum locaux uniquement sont conservés par le filtre. La suppression des non maximum aura pour effet de produire une frontière fine.
5. Finalement, un seuil bas ( $T_1$ ) et un seuil haut ( $T_2$ ) sont appliqués aux pixels restants.
  - si  $E(x, y) < T_1$ , la valeur 0 est assignée au pixel (x,y) puisqu'il n'appartient pas au contour;
  - si  $E(x, y) > T_2$ , la valeur 1 est assignée au pixel (x,y). C'est un pixel inconditionnel du contour;
  - si  $T_1 < E(x, y) < T_2$ , le pixel est rejeté sauf s'il est dans le voisinage d'un pixel inconditionnel du contour.

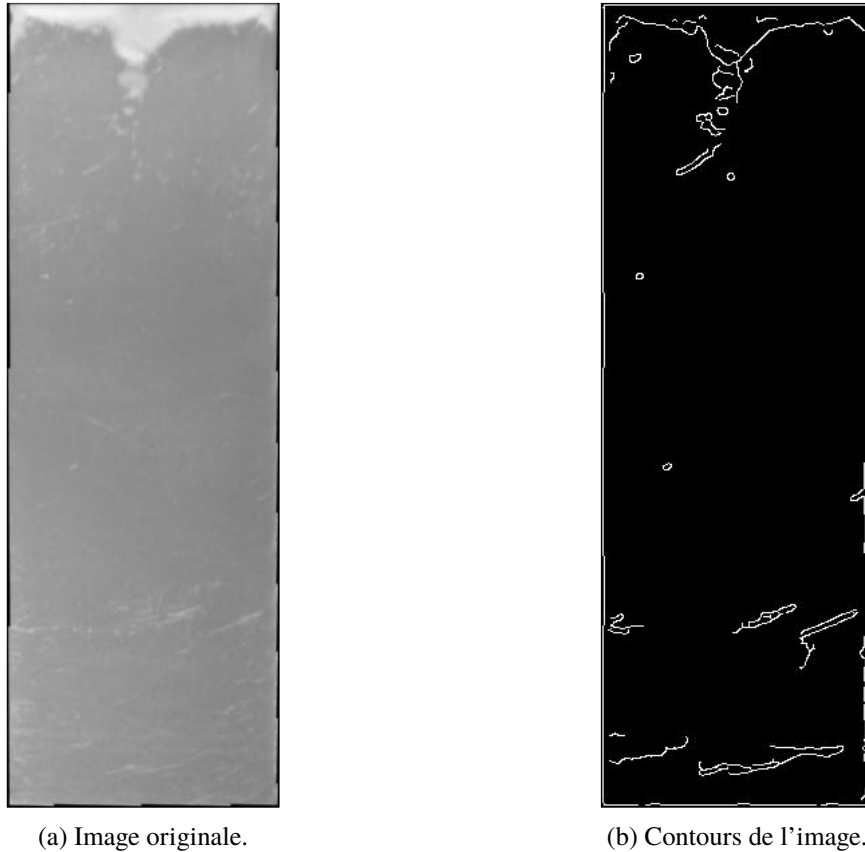


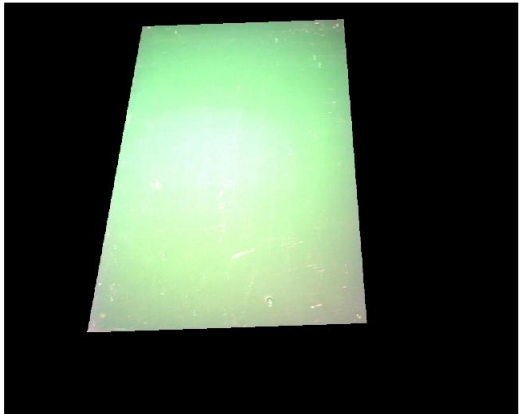
Figure 5.5: Résultat de l'application de l'algorithme de Canny pour la détection des contours.

## 5.9 Vue orthogonale

La détermination du temps d'endurance du fluide étudié se fait, entre autre, en évaluant la surface de la plaque recouverte de givre. Afin d'évaluer l'aire de cette surface, il est important d'avoir une vue orthogonale de la plaque. En effet, cette vue permet d'éliminer les effets de perspective pouvant mener à une erreur lors de l'évaluation de l'aire.

De façon générale, la position relative de l'appareil photo par rapport à la plaque du montage expérimental à l'intérieur d'une chambre climatique n'est pas nécessairement orthogonale. Pour pallier à cette difficulté, une image avec une vue orthogonale de la plaque est créée à partir de l'image réelle.

Pour ce faire, les dimensions physiques de la plaque sont utilisées. Ces dimensions sont connues a priori puisqu'elles sont spécifiées dans la norme [5]. Les quatre coins de la plaque sont alors placés aux quatre coins du rectangle de dimensions connues et les autres points sont projetés de façon à ce que les lignes restent droites et que les lignes parallèles convergent à l'infini (figure 5.6).



(a) Plaque segmentée.



(b) La plaque après les transformations géométriques proposées.

Figure 5.6: Vue orthogonale de la plaque.

## 5.10 Région connectée

Les pixels d'une image binaire ayant une valeur de 1 sont connectés s'ils sont à côté ou en diagonal (8-connected). Un ensemble ininterrompu de pixels connectés est nommé région connectée.

Il est utile d'utiliser les régions connectées pour éliminer du bruit dans les images des essais WSET et LZR. Dans ces essais, le givre se forme à partir du haut de la plaque (et des côtés, pour WSET), de façon continue. L'algorithme, ne gardant que la plus grande région connectée, rejette ainsi de plus

petite région de faux positifs. La figure 5.7 représente l'image avant et après l'application d'un filtre ne gardant que la plus grande région connectée.



(a) Plusieurs régions connectées (en blanc).



(b) La plus grande région connectée.

Figure 5.7: Résultat d'un algorithme conservant uniquement la plus grande région connectée.

Afin de trouver les régions connectées, la matrice  $\mathbf{I}$  est parcourue séquentiellement de haut en bas et des étiquettes sont assignées aux éléments ayant une valeur de 1 [16]. Lorsqu'un élément  $I_{ij}$  ayant une valeur de 1 est rencontré, ceux des 8 voisins précédemment rencontrés sont examinés :

- Si tous les éléments voisins ont une valeur de 0, une nouvelle étiquette est assignée à l'élément

$I_{ij}$ .

- Sinon, si seulement un des voisins a une valeur de 1, l'étiquette de celui-ci est assignée à l'élément  $I_{ij}$ .
- Sinon, si plus d'un élément voisin a une valeur de 1, assigner l'étiquette d'un de ceux-ci à l'élément  $I_{ij}$ . Établir des équivalences entre les étiquettes et changer les étiquettes de tous les autres éléments en conséquence.

## 5.11 Algorithme de réduction du bruit basé sur le filtre de Kalman

Le filtre de Kalman [17] peut être utilisé pour réduire le bruit dans une séquence d'images évoluant dans le temps en prédisant l'image suivante. L'image prédite est ensuite utilisée pour corriger l'image réelle. Cette approche de prédiction et correction appliquée de façon récursive permet d'enlever le bruit à gain élevé de la séquence d'images tout en préservant les détails de l'image. L'efficacité augmente avec le nombre d'itération, c'est-à-dire la position de l'image dans la séquence. Le filtre de Kalman est le plus efficace pour réduire l'erreur moyenne quadratique (Mean Square Error) entre une image sans bruit et la même image débruitée provenant d'une source vidéo.

À partir de la  $n$ ème image réelle  $\mathbf{O}_n$  (observée), du gain  $G$  et de la variance estimée, l'algorithme donne une  $n$ ème image modifiée  $\mathbf{I}_n$ . Cette image modifiée est une moyenne pondérée de l'image réelle, l'image prédite lors de l'itération précédente  $\mathbf{I}'_n$  et l'écart entre l'image réelle et l'image prédite  $\mathbf{O}_n - \mathbf{I}'_n$ .

Les différentes étapes de l'algorithme [18] sont :

### 1. Initialisation

- Spécifier le gain :  $0 \leq G \leq 1$ .

Le gain spécifie les poids relatifs des valeurs prédites par rapport aux valeurs observées.

$$G = \begin{cases} 0 \text{ à } 0.5 & \text{Poids des valeurs observées plus important que le poids des valeurs prédites.} \\ 0.5 \text{ à } 1 & \text{Poids des valeurs prédites plus important que le poids des valeurs observées.} \end{cases}$$

- Spécifier la variance estimée du bruit :  $0 \leq V \leq 1$
- Utiliser la première image comme prédiction initiale :  $\mathbf{I}'_1 = \mathbf{I}_1$
- Utiliser la variance estimée du bruit comme valeur initiale de l'erreur :  $E'_1 = V$

## 2. Correction de l'erreur

- Calculer le gain de Kalman :

$$K_n = \frac{E'_n}{E'_n + V}$$

- Mettre à jour l'image prédite avec l'image observée ( $\mathbf{O}_n$ ) :

$$\mathbf{I}_n = G\mathbf{I}'_n + (1 - G)\mathbf{O}_n + K_n(\mathbf{O}_n - \mathbf{I}'_n)$$

- Mettre à jour la variance estimée du bruit :

$$E_n = (1 - K_n)E'_n$$

## 3. Prédiction

- Prédire la prochaine image :  $\mathbf{I}'_{n+1} = \mathbf{I}_n$



- Prédire la variance de la prochaine image :  $E'_{n+1} = E_n$

4. Mettre à jour les valeurs

- $E'_n = E'_{n+1}$
- $I'_n = I'_{n+1}$

5. Répéter les étapes 2, 3 et 3 pour chacune des images de la séquence.

L'implémentation de cette procédure dans MATLAB a été fait par M. Rob Campbell [19]. Une copie est disponible à l'annexe 2.

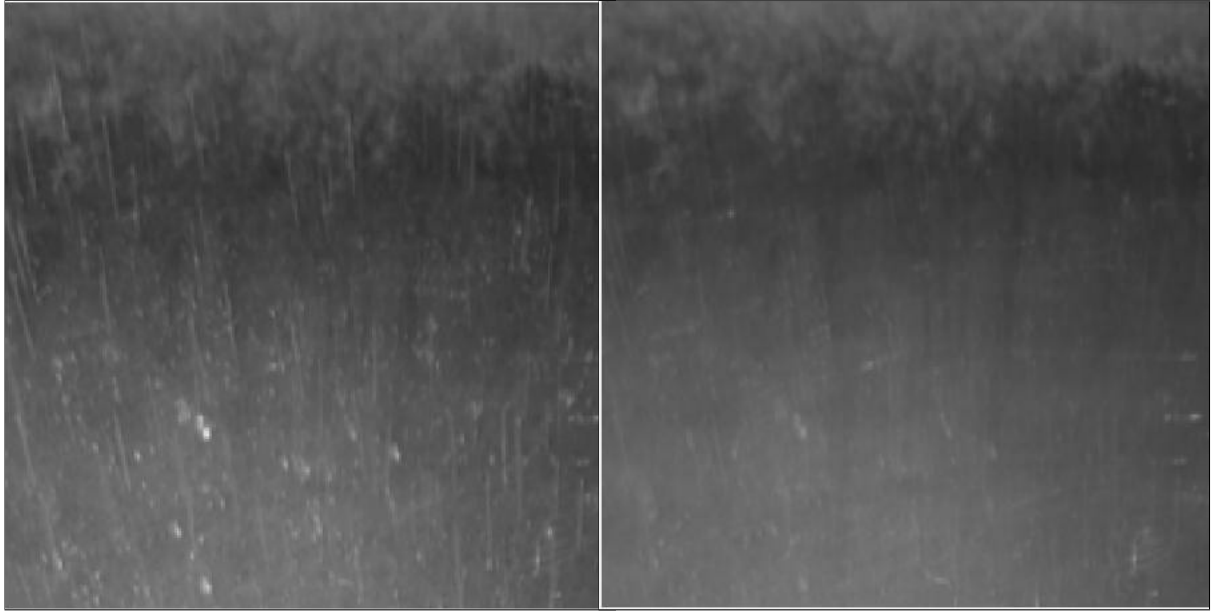
### 5.11.1 Utilisation des filtres de Kalman pour l'élimination de faux positifs

Lors d'un essai d'endurance, des précipitations sont envoyées périodiquement sur la plaque pour simuler des conditions climatiques réelles auxquelles pourrait être exposée l'avion avant le décollage. Parfois, il arrive qu'une photo est prise alors que les précipitations sont entre l'appareil photo et la plaque. Il y a alors du bruit sur la photo qui peut poser problème lors de la détection automatisée du givre.

Par exemple, le détecteur de Canny pourrait détecter de faux positifs, c'est-à-dire interpréter ces précipitations comme du givre. En effet, la trajectoire des précipitations est visible sur l'image et est détectée comme un contour.

Un filtre de Kalman permet de réduire ce bruit en éliminant le plus possible les structures qui ne sont présentes que dans une des images de la séquence en prédisant la prochaine image à partir des images précédentes et d'une estimation du bruit. Les prédictions s'améliorent avec le temps permettant à cette approche d'essentiellement éliminer ce problème après un moment.

La figure 5.8 illustre l'efficacité du filtre de Kalman pour éliminer les gouttes de pluie verglaçante tombant sur la plaque lors d'un essai LZR.



(a) Image non filtrée.

(b) Image filtrée par un filtre de Kalman.

Figure 5.8: Application du filtre de Kalman sur un essai de pluie verglaçante.

## 5.12 Représentation HSV

Les images en couleurs (RGB) peuvent être transformées en image HSV [16]. La teinte (H), la saturation (S) et la valeur maximale (V) du rouge, vert ou bleu pour un pixel en particulier sont représentées numériquement dans trois matrices différentes combinée dans une matrice multidimensionnelle  $I_{ijk}$ . Le premier indice ( $i$ ) de la matrice correspond à la ligne de l'image, le deuxième ( $j$ ) la colonne et le troisième ( $k$ ) la valeur de H, S ou V.

### 5.13 Filtre homomorphique

Les filtres homomorphiques sont particulièrement efficaces lorsque les signaux sont non linéaires. En effet, ils utilisent la fonction logarithmique afin de transformer les signaux non linéaires en signaux additifs avant de leur appliquer un filtre linéaire dans l'espace des fréquences. La fonction inverse (exponentielle) est ensuite appliquée [20].

Le filtre homomorphique accentue les caractéristiques de l'image tout en uniformisant l'éclairage [21]. En effet, l'illumination de la source  $e(x, y)$  et la réflectance de l'objet  $r(x, y)$  se combinent de façon multiplicative lors de la formation de l'image [20] :

$$i(x, y) = e(x, y)r(x, y) \quad (5.12)$$

Afin d'obtenir le résultat souhaité, l'image RGB a d'abord été convertie en image HSV. Ensuite, les signaux multiplicatifs sont transformés en signaux additifs avec la fonction logarithmique suivante :

$$j(x, y) = \ln(e(x, y)) + \ln(r(x, y)) \quad (5.13)$$

Puis, la transformée de Fourier est utilisée pour obtenir la fonction dans le domaine des fréquences :

$$\mathcal{F}\{j(x, y)\} = \mathcal{F}\{\ln(e(x, y))\} + \mathcal{F}\{\ln(r(x, y))\} \quad (5.14)$$

*ou*

$$J(u, v) = E(u, v) + R(u, v) \quad (5.15)$$

Un filtre passe-haut  $H(u,v)$  est alors appliqué :

$$J'(u, v) = H(u, v)E(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (5.16)$$

Ensuite, la transformée de Fourier inverse est utilisée pour retourner au domaine spatial :

$$j'(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{J'(u, v)\} \quad (5.17)$$

Et le logarithme initial est inversé avec l'exponentielle :

$$i'(x, y) = e^{j'(x, y)} \quad (5.18)$$

Finalement, l'image est reconvertie en image RGB.

Le filtre passe-haut utilisé est un filtre de Butterworth :

$$H(u, v) = 1 - \frac{1}{1 + 16(u^2 + v^2)^2} \quad (5.19)$$

La figure 5.9 illustre l'utilité de cette méthode pour uniformiser l'éclairage étant donné l'éclairage direct utilisé et la nature réflexive de la surface éclairée.

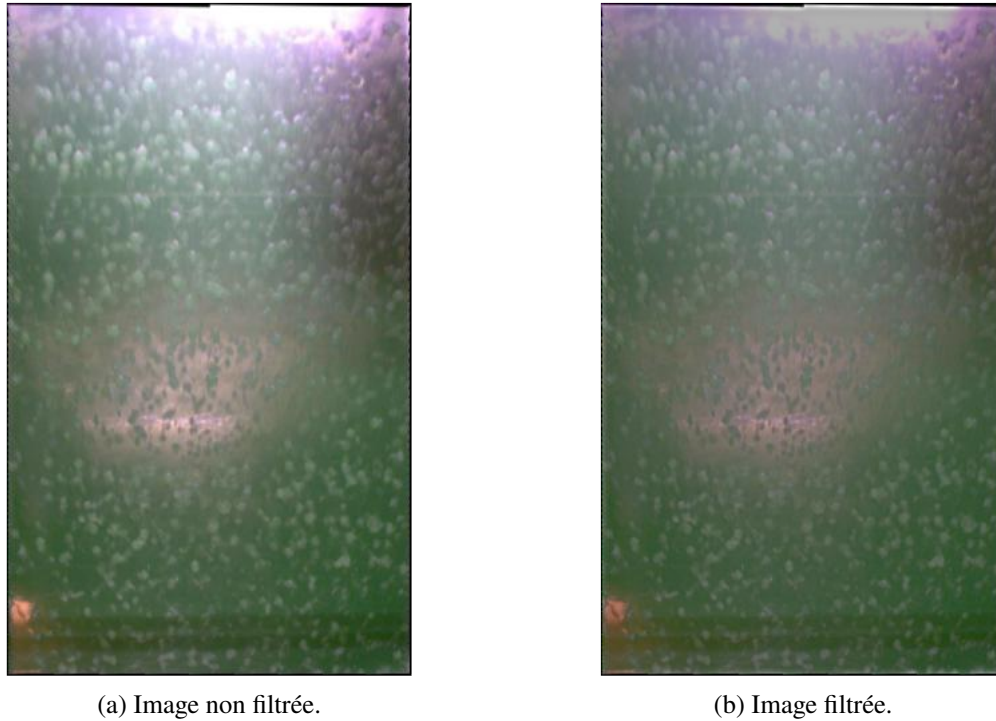


Figure 5.9: Filtre homomorphique.

L'implémentation de cette procédure dans MATLAB a été fait par M. Peter Kovesi [21]. Une copie est disponible à l'annexe 2.

## 5.14 Détermination du pourcentage de l'aire givrée de la plaque

Le pourcentage de l'aire givrée  $A_g$  est calculé à partir de la matrice image segmentée  $S$  de dimensions  $m \times n$ . Le nombre de pixel correspondant à la partie givrée est calculé, puis, divisé par le nombre total de pixel de l'image pour obtenir la proportion de l'aire givrée de la plaque. Puisqu'un élément de  $S$  représentant un pixel givré a une valeur de 1 alors qu'un élément non givré à une valeur de 0, le

pourcentage d'aire givrée est calculé ainsi :

$$A_g = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij}}{mn} \times 100\% \quad (5.20)$$

### 5.15 Algorithme pour les essais au brouillard givrant

Au début de l'essai, la plaque est lisse. Le givre commence à se former en haut et sur les côtés de la plaque sous la forme d'une zone texturée (Figure 5.10). Il est possible d'identifier cet endroit en identifiant les contours dans l'image. En effet, des contours peuvent être détectés dans la texture de la zone givrée alors qu'il n'y en a pas dans la partie lisse non givrée de la plaque. Ces contours ne représentent pas le périmètre de la zone givrée, toutefois, en accumulant ceux-ci et en appliquant diverses opérations morphologiques, il est possible de segmenter la partie givrée de la plaque.

Voici les étapes de l'algorithme :

1. Effectuer un ajustement gamma  $\gamma = 2$  (Figure 5.10b).
2. Convertir en dégradés de gris (Figure 5.10c).
3. Appliquer un filtre de Kalman (Figure 5.11a).
4. Détecter les contours avec l'algorithme de Canny (Figure 5.11b).
5. Accumuler les contours détectés (Figure 5.11c).
6. Remplir les trous (Figure 5.12a).
7. Conserver uniquement la plus grande région connectée (Figure 5.12b).

8. Évaluer le critère d'échec (Figure 5.12c).

Pour évaluer le critère d'échec, la valeur de tous les pixels est additionnée dans la zone d'échec.

Si le résultat de cette sommation n'est pas zéro, il y a du givre dans la zone d'échec.

9. Recommencer à l'étape 1 avec l'image suivante.



(a) Originale.



(b) Ajustement gamma.



(c) Conversion de RGB à dégradés de gris.

Figure 5.10: Algorithme de détection du givre pour un essai de brouillard givrant (WS8234).





(a) Filtre de Kalman.



(b) Détection des contours avec l'algorithme de Canny.

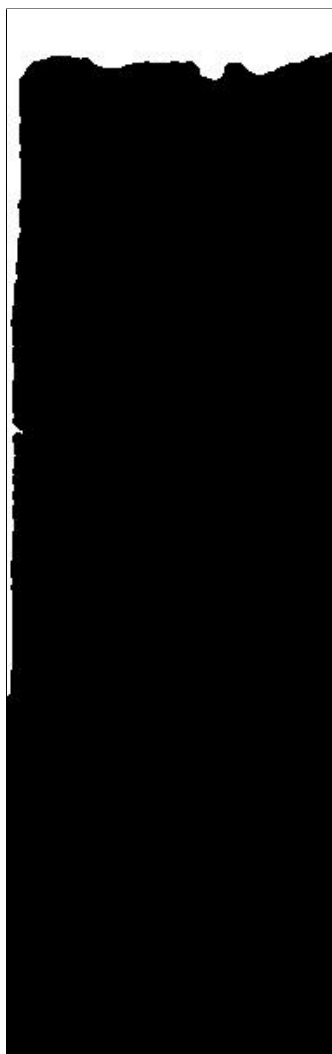


(c) Addition avec ce qui a été détecté précédemment.

Figure 5.11: Algorithme de détection du givre pour un essai de brouillard givrant (WS8234): partie 2



(a) Remplir les trous.



(b) Plus grande région connectée.



(c) Représentation de la zone d'échec.

Figure 5.12: Algorithme de détection du givre pour un essai de brouillard givrant typique: partie 3 (WS8234).

## 5.16 Algorithme pour les essais de pluie verglaçante légère

Cet algorithme est basé principalement sur la soustraction de l'arrière-plan afin de faire abstraction de la plaque et de détecter le givre qui se forme.

Premièrement, un filtre gaussien et un filtre homomorphique sont appliqués afin de réduire le bruit et d'uniformiser l'éclairage. Ensuite, l'arrière-plan représentant la plaque avec le fluide sans le givre est estimé. Puis, cet arrière-plan est soustrait à l'image afin d'obtenir uniquement le givre s'étant formé sur la plaque. Chaque nouvelle image produit une estimation de l'endroit où le givre est situé. Une moyenne pondérée dans le temps de ces estimations est calculée donnant une importance accrue aux pixels interprétés comme différents de l'arrière-plan pour plusieurs images consécutives. Lorsque la valeur d'un pixel de cette moyenne franchit un certain seuil, il est déclaré pixel givré.

Les pixels identifiés comme givre sont accumulés avec le temps dans une image binarisée givrée/non-givrée. Puis, diverses opérations morphologiques sont appliquées pour corriger les imperfections de l'aire détectée. Finalement, le critère d'échec est évalué à partir du pourcentage d'aire givrée calculé à l'aide de l'image binarisée et le programme reprend l'algorithme du début avec l'image suivante.

Voici les étapes de l'algorithme :

1. Filtrer l'image avec un filtre gaussien de déviation standard 2 (Figure 5.13b).
2. Filtrer l'image avec un filtre homomorphique 2 (Figure 5.13c).
3. Estimer l'arrière plan de l'image (Figure 5.14a).

Pour la première image évaluée, l'arrière-plan correspond à celle-ci :  $\mathbf{B}_1 = \mathbf{I}_1$ . Sinon, l'arrière-

plan est un mélange de l'image actuelle  $\mathbf{I}_n$  et de l'arrière-plan précédent  $\mathbf{B}_{n-1}$  :

$$\mathbf{B}_n = (1 - \alpha)\mathbf{I}_n + \alpha\mathbf{B}_{n-1} \quad (5.21)$$

Des poids  $\alpha$  et  $1 - \alpha$  sont utilisés afin d'ajuster l'importance de la contribution de  $\mathbf{I}_n$  et de  $\mathbf{B}_{n-1}$  à l'arrière-plan  $\mathbf{B}_n$ . Il a été déterminé de façon empirique que  $\alpha = 0,8$  est un choix approprié pour ce paramètre.

4. Soustraire l'arrière plan à l'image (Figure 5.14b).
5. Additionner les pixels givrés trouvés précédemment (Figure 5.14c).
6. Binariser l'image à l'aide de l'algorithme d'Otsu (Figure 5.15a).
7. Accumuler les pixels interprétés comme différents de l'arrière-plan lorsque plusieurs images consécutives contiennent ces pixels (signal fort).

Pour ce faire, une moyenne pondérée de la matrice des pixels interprétés comme différents de l'arrière-plan précédemment et ceux détectés comme différents de l'arrière-plan pour l'image en cours est calculée :

$$\mathbf{B}_n = \beta\mathbf{B}_{n-1} + \eta\mathbf{B}_n \quad (5.22)$$

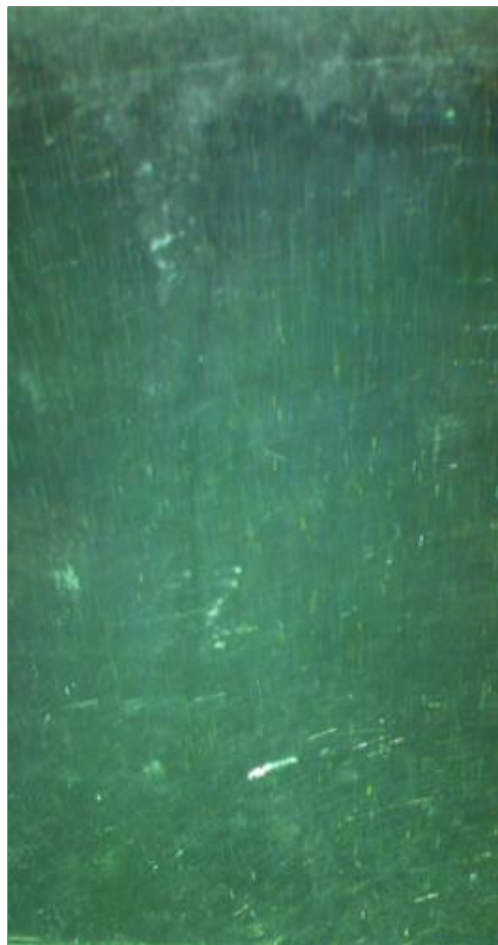
Lorsque les pixels de  $\mathbf{B}_n$  franchissent un certain seuil, ils sont déclarés comme étant du givre.

La matrice binaire givrée/non-givrée  $\mathbf{G}_n$  est définie comme :

$$G_{n_{ij}} = \begin{cases} 0 & \text{si } B_{n_{ij}} < T \\ 1 & \text{si } B_{n_{ij}} \geq T \end{cases} \quad (5.23)$$

Les paramètres suivants, trouvés expérimentalement, ont été utilisé :  $\beta = \frac{3}{2}$ ,  $\eta = \frac{1}{5}$ ,  $T = 0,45$ . La valeur du paramètre  $\beta$  utilisée est beaucoup plus grande que celle de  $\eta$  ce qui réduit l'importance des pixels détectés sur l'image actuelle. Par contre, lorsque ceux-ci sont détectés sur plusieurs images consécutives, ils franchissent le seuil et sont déclarés comme du givre.

8. Remplir les trous (Figure 5.15b).
9. Conserver uniquement la région connectée la plus grande (Figure 5.15c).
10. Calculer le pourcentage de l'aire givrée.
11. Évaluer le critère d'échec.
12. Recommencer à l'étape 1 avec l'image suivante.



(a) Originale.



(b) Filtre gaussien.

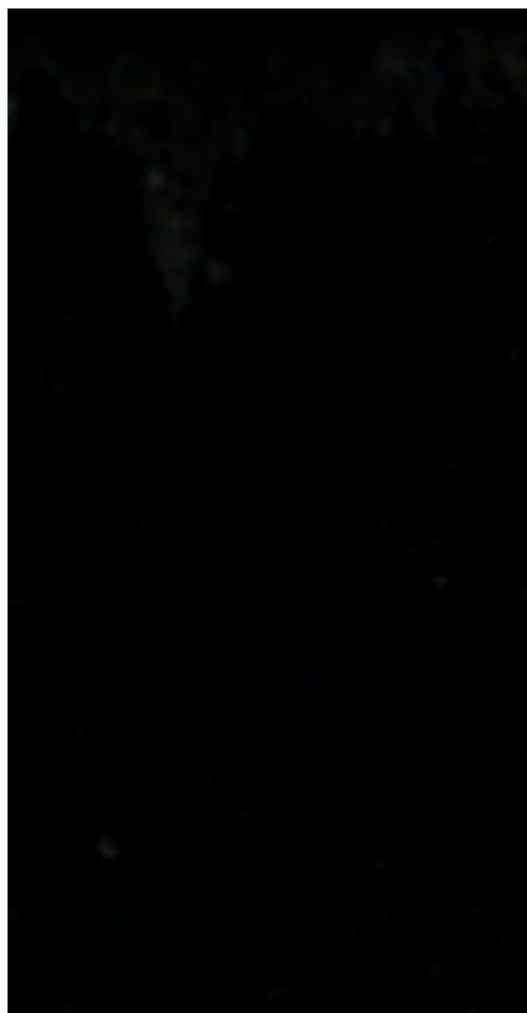


(c) Filtre homomorphique.

Figure 5.13: Algorithme de détection du givre pour un essai de pluie verglaçante légère typique: partie 1 (LZRB002).



(a) Arrière-plan.



(b) Différence entre l'image et l'arrière-plan.



(c) Addition avec ce qui a été détecté précédemment.

Figure 5.14: Algorithme de détection du givre pour un essai de pluie verglaçante légère typique: partie 2 (LZRB002).



(a) Binarisation.



(b) Remplir les trous.



(c) Plus grande région connectée.

Figure 5.15: Algorithme de détection du givre pour un essai de pluie verglaçante légère typique: partie 3 (LZRB002).



## 5.17 Algorithme pour les essais de neige

Les essais de neige sont les essais dans lesquels il y a le plus de bruit. La reconnaissance de la neige non absorbée (neige blanche) doit se faire en faisant abstraction de la neige en train de tomber. Aussi, la neige en train d'être absorbée par le fluide ne doit pas être détectée. De plus, la couleur de la neige en train d'être absorbée est nettement différente de celle qui s'accumule sur la plaque. Pour ces raisons, un algorithme basé sur la segmentation de couleurs a été préféré à ceux basés sur la détection de changement ou de contours.

La machine à neige au-dessus de la plaque produit des réflexions sur cette dernière qui se déplacent d'image en image. Ces réflexions font en sorte qu'il y a des zones qui semblent blanches comme la neige alors qu'il n'y en a pas à ces endroits. Comme la neige blanche à détecter est une accumulation de neige blanche à la surface du fluide, un filtre de Kalman est préalablement appliqué de façon à obtenir une image qui est un mélange entre l'image réelle et l'image prédite. Puisque l'apparition soudaine d'une réflexion n'est pas prédite par l'algorithme de Kalman, l'effet de celle-ci sur l'image filtrée est diminué de façon significative.

L'image est ensuite binarisée en utilisant un seuil adéquat pour garder les sections de neige blanche et rejeter les sections de neige en train de diluer le fluide. Tous les pixels reconnus comme étant de la neige sont ajoutés à ceux reconnus dans les images précédentes.

Finalement, le critère d'échec est évalué à partir du pourcentage d'aire recouverte par la neige calculé à l'aide de l'image binarisée et le programme reprend l'algorithme du début avec l'image suivante.

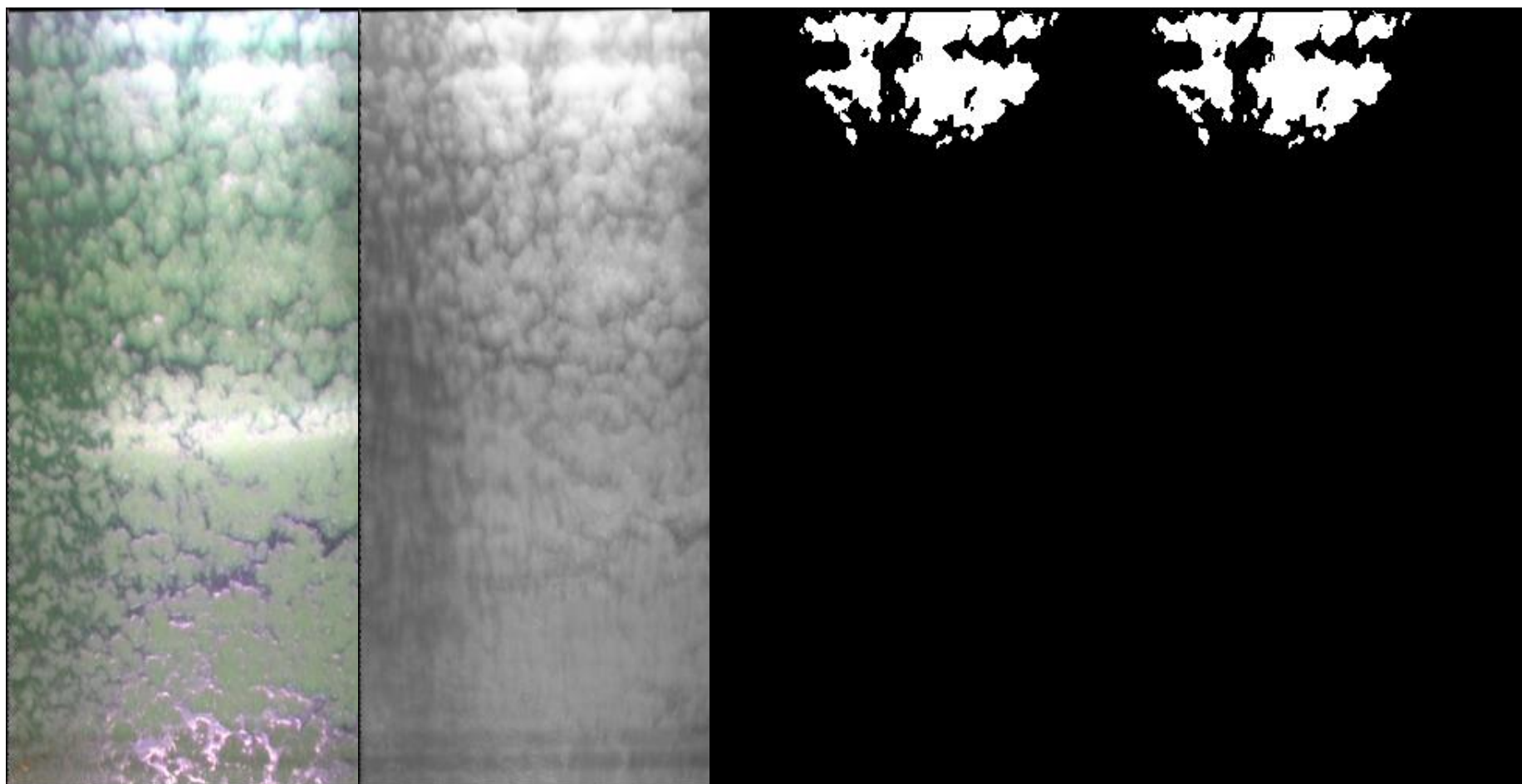
Voici les étapes de l'algorithme :

1. Appliquer le filtre de Kalman (Figure 5.16b).

2. Binariser à l'aide d'un seuil approprié (Figure 5.16c).

Le filtre de Kalman produit une image en dégradés de gris : 0 étant noir et 255 étant blanc. Il a été déterminé expérimentalement que des seuils autour de 220 permettent de garder que la neige blanche accumulée sur la plaque.

3. Ajouter les pixels détectés à ceux détectés précédemment (Figure 5.16d).
4. Calculer le pourcentage de l'aire givrée.
5. Évaluer le critère d'échec.
6. Recommencer à l'étape 1 avec l'image suivante.



(a) Originale.

(b) Filtre de kalman.

(c) Image binaire.

(d) Image cumulative.

Figure 5.16: Algorithme de détection du givre pour un essai de neige (SNWH477).

## 5.18 Algorithme pour la segmentation automatique de la plaque

Le programme peut tenter de détecter la plaque automatiquement avec l'algorithme décrit dans cette section pour les essais LZR et SNW. Si la plaque n'est pas détectée assez précisément, le technicien scientifique peut choisir d'en définir lui-même les contours en sélectionnant les quatre coins de celle-ci.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour la segmentation automatique de la plaque. Premièrement, les contours sont détectés et l'image est binarisée. Puis, certaines opérations morphologiques sont effectuées pour obtenir une forme irrégulière recouvrant la plaque. Ensuite, le centre de cette forme irrégulière est calculé et des points autour de ce centre sont générés aléatoirement. Par la suite, ces points sont déplacés vers la gauche, la droite, le haut et le bas jusqu'à ce qu'ils atteignent la frontière de la forme irrégulière. Les sous-ensembles de points s'étant déplacés dans une direction donnée sont utilisés pour trouver les équations de quatre droites par régression linéaire.

Ces droites correspondent aux côtés de la plaque. Les intersections de ces droites (les coins) sont alors projetés sur les coins d'un rectangle ayant les dimensions connues de la plaque. Finalement, l'image est rognée et le processus répété pour les autres images en utilisant un masque créé avec la première pour diminuer le temps de calcul.

Voici les étapes de l'algorithme en détail :

1. Saturer les couleurs dans le 1% inférieur et supérieur pour chacun des canaux R, G et B (Figure 5.17b).
2. Détecter les contours dans l'image RGB en utilisant chacun des canaux (sans la convertir en dégradés de gris) (Figure 5.17c).

3. Convoluer l'image avec le noyau **N** suivant (Figure 5.17d):

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 49 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

4. Binariser l'image en utilisant l'algorithme d'Otsu (Figure 5.17e).

5. Conserver uniquement les 200 régions connectées ayant le plus grand périmètre (Figure 5.17f).

6. Dilater l'image à l'aide d'un élément structurant en forme de disque (Figure 5.18a).

7. Inverser l'image (Figure 5.18b).

8. Conserver uniquement la plus grande région connectée : la plaque (Figure 5.18c).

9. Remplir les trous (Figure 5.18d).

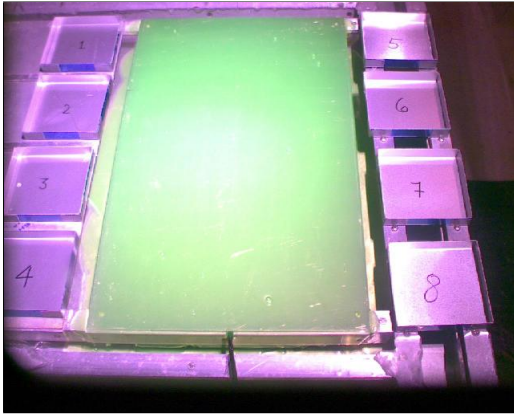
10. Effectuer des opérations morphologiques d'ouverture en utilisant comme éléments structurants des lignes horizontales et verticales (Figure 5.18e).

11. Garder uniquement la plus grande région connectée.

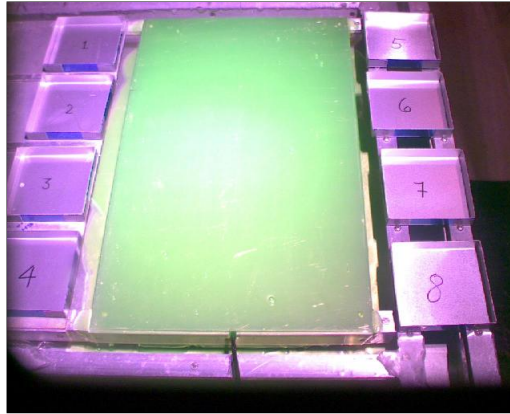
12. Trouver les coordonnées du centre de celle-ci.

13. Choisir 1000 points de façon aléatoire à l'intérieur d'un petit rectangle centré sur les coordonnées trouvées à l'étape précédente (Figure 5.19a).

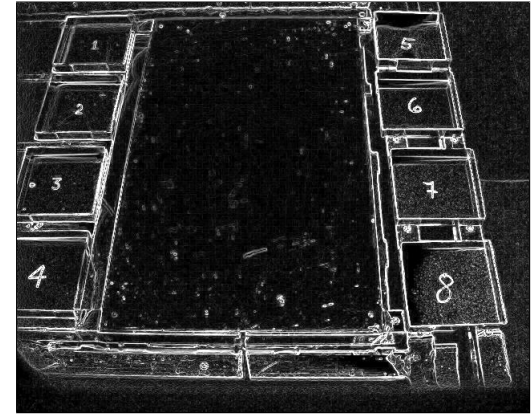
14. Déplacer les 1000 points dans toutes les directions jusqu'au périmètre de la partie segmentée trouvée précédemment (Figure 5.19b).
15. Déterminer les équations des droites représentant les côtés de la plaque par régression linéaire en utilisant les points déplacés jusqu'au périmètre (Figure 5.19c).
16. Trouver les coordonnées des points d'intersections des droites (Figure 5.19d).
17. Reprendre l'image originale et mettre tous les pixels hors plaque à 0 pour chacun des canaux RGB (Figure 5.19e).
18. Utiliser les dimensions réelle de la plaque pour obtenir une vue orthogonale (Figure 5.19f).
19. Créer un masque de la plaque et l'appliquer à toutes les images de la séquence.
20. Appliquer la transformation orthogonale à toutes les images de la séquence.
21. Rogner la partie hors plaque de toutes les images de la séquence et enregistrer les nouvelles images de la plaque.



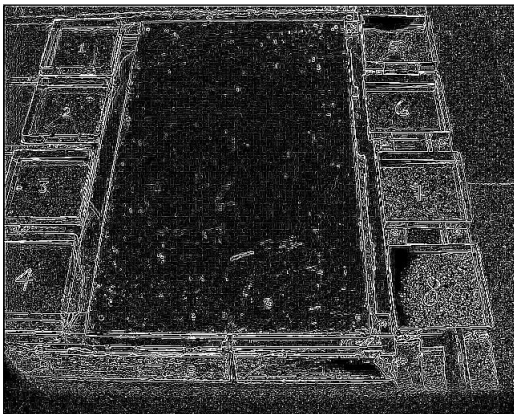
(a) Originale.



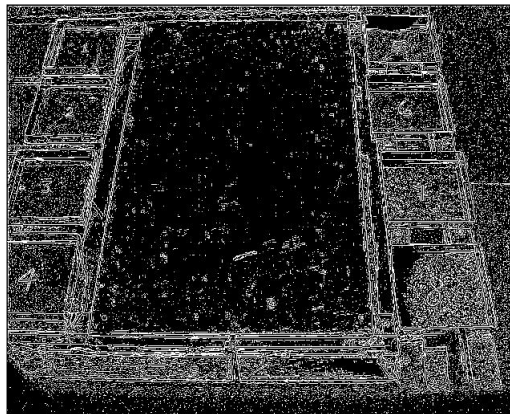
(b) Saturer les couleurs.



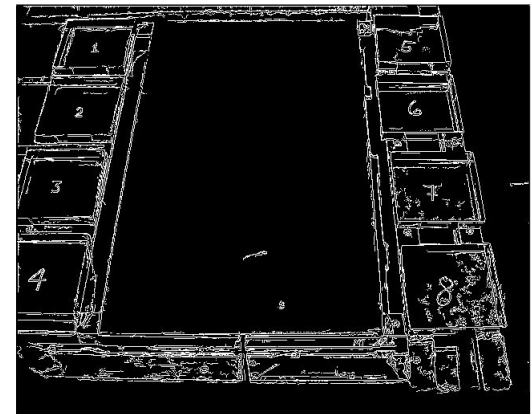
(c) Détecter les contours.



(d) Convoluer avec noyau  $N$ .

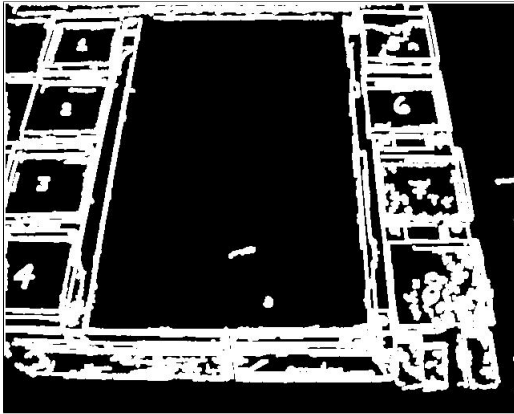


(e) Binariser avec l'algorithme d'Otsu.

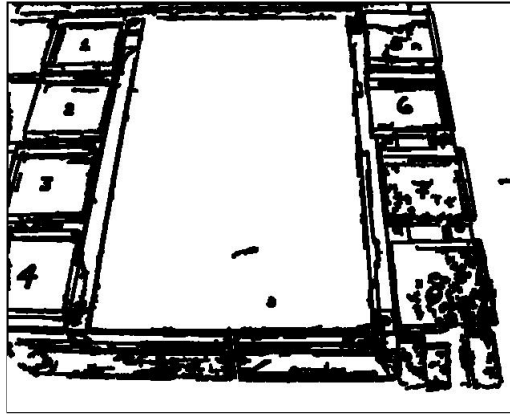


(f) Conserver 200 régions connectées.

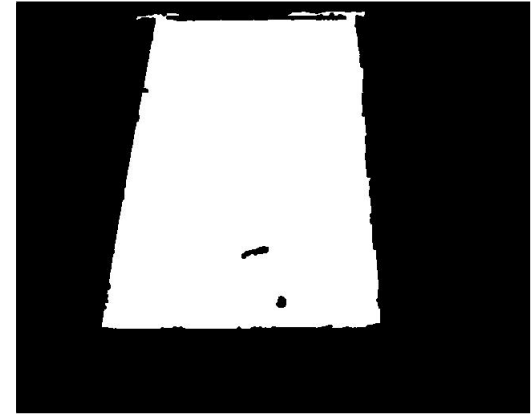
Figure 5.17: Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique.



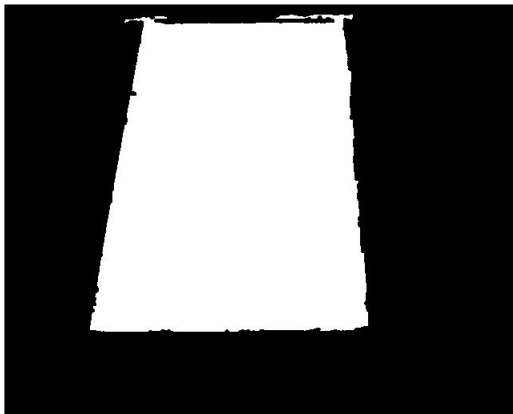
(a) Dilater avec un disque.



(b) Inverser l'image.



(c) Conserver la plus grande région connectée.



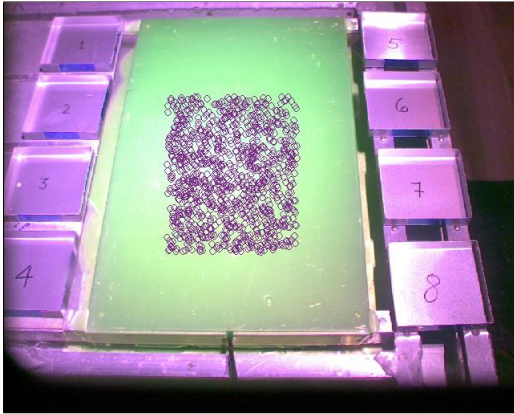
(d) Remplir les trous.



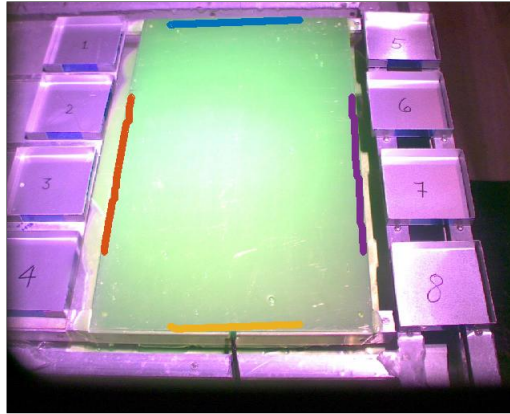
(e) Opérations morphologiques.

Figure 5.18: Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique: partie 2.

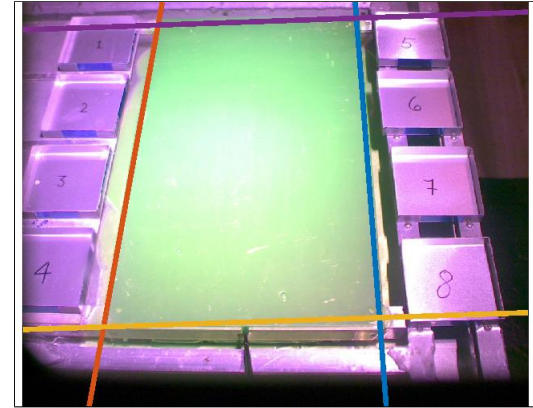




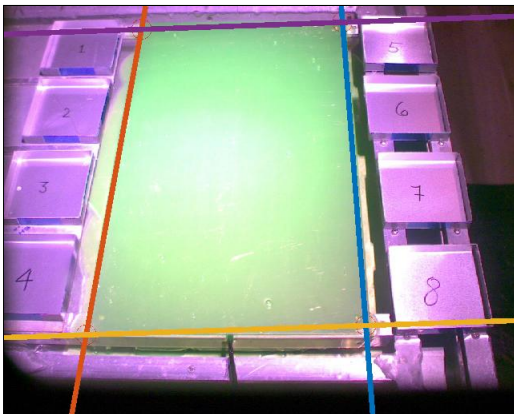
(a) Choisir 1000 points aléatoirement à l'intérieur de la forme irrégulière.



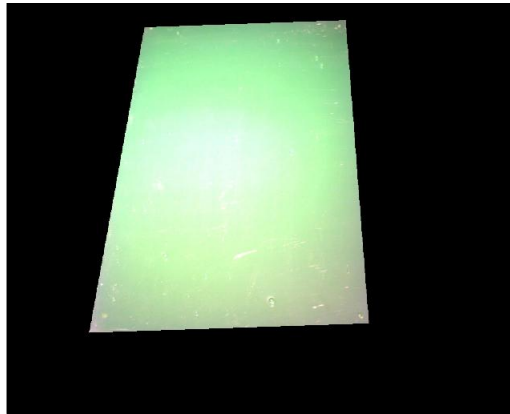
(b) Déplacer les points jusqu'au périmètre de la forme irrégulière.



(c) Tracer les droites.



(d) Trouver les intersections des droites.

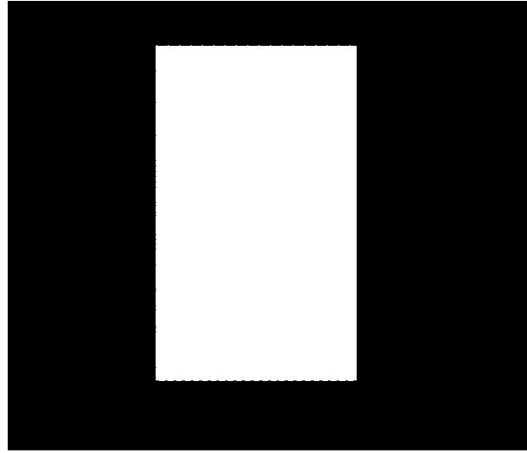


(e) Mettre tous les pixels hors plaque de l'image originale à 0.



(f) Vue orthogonale de la plaque.

Figure 5.19: Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique: partie 3.



(a) Masque à utiliser pour les autres images.



(b) Image de la plaque segmentée.

Figure 5.20: Algorithme de segmentation automatique de la plaque pour un essai LZR typique: partie 4.

## **Chapitre 6**

### **Analyse des résultats**

Ce chapitre présente les résultats obtenus par les algorithmes et les compare à ceux obtenus par les techniciens scientifiques du LIMA.

Afin de déterminer la fiabilité des algorithmes décrits au chapitre précédent pour la détection du givre et la détermination automatisée du temps d'endurance pour les essais WSET, LZR et SNW, les résultats obtenus par le technicien présent lors de l'essai ainsi que la moyenne de ceux obtenus par trois techniciens scientifiques du LIMA en utilisant les photographies sont comparés à ceux obtenus par le logiciel MATLAB implémentant ces algorithmes.

Puis, les photos du moment de l'échec déterminé par le logiciel et leur image binaire givrée/non-givrée correspondante sont présentés.

Suit une discussion analysant les résultats, les causes d'erreurs, les limites et proposant des améliorations à apporter.

## **6.1 Comparaison des temps d'endurance**

### **6.1.1 Méthodologie**

L'interprétation des résultats se fait en comparant les temps d'endurance obtenus par les algorithmes (Algorithme) à ceux obtenus des deux autres façons.

Premièrement, les photos utilisés par les algorithmes sont interprétées par trois techniciens scientifiques afin de déterminer, de façon indépendante, le temps d'endurance. Puis, la moyenne (Tech Moyenne) et la déviation standard (Dév STD) de ces trois temps d'endurance sont calculées pour chacun des essais. Lorsque le temps d'endurance trouvé par l'algorithme est à l'intérieur d'une déviation standard de la moyenne des temps d'endurance des techniciens, il est considéré qu'il n'y a pas d'écart

significatif entre les deux valeurs.

Ce critère a été choisi pour considérer la variabilité des temps d'endurance pour différents techniciens. En effet, si les trois techniciens sont unanimes sur le temps d'endurance, par exemple pour l'essai LZRB006, il n'y a aucune ambiguïté quant à la vérification du critère d'échec et l'algorithme devrait donner le même temps d'endurance. Pour cet essai, la déviation standard est de 0 minute.

Par contre, pour un essai pour lequel les techniciens donnent des temps d'endurance très différents, par exemple pour l'essai WS8233, l'algorithme devrait avoir plus de latitude. Pour cet essai, la déviation standard est de 11 minutes. En plus du critère précédent, un autre devrait permettre de considérer que l'algorithme donne un temps d'endurance satisfaisant même s'il n'est pas exactement égal à la moyenne de ceux des techniciens.

Par exemple, pour l'essai LRZB006, le temps d'endurance déterminé par l'algorithme est de 112 minutes alors que celui moyen pour les techniciens est de 114 minutes et la déviation standard est de 0 minute. Selon le critère précédent, il y aurait donc un écart significatif entre ces valeurs. Or, l'auteur estime que ces valeurs sont suffisamment rapprochées pour considérer que l'algorithme a correctement déterminé le temps d'endurance de cet essai car il y a un facteur humain à considérer. Pour considérer cela, le pourcentage d'écart entre le temps d'endurance déterminé par l'algorithme et la moyenne de ceux déterminés par les techniciens est calculé comme suit :

$$\% \text{ écart} = \frac{|\text{Tech Moyenne} - \text{Algorithme}|}{\text{Tech Moyenne}} \times 100\% \quad (6.1)$$

Si ce pourcentage d'écart est égal ou inférieur à 5%, il sera considéré qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les valeurs.

Deuxièmement, les temps d'endurance obtenus par les algorithmes sont comparés à ceux déterminés par le technicien présent lors de l'essai. Étant donné qu'il n'y a qu'une seule valeur et que l'incertitude sur celle-ci n'est pas évaluée, le seul critère qui sera utilisé afin de déterminer s'il y a un écart significatif entre les deux temps d'endurance repose sur le pourcentage d'écart entre le temps d'endurance déterminé par l'algorithme et celui déterminé par le technicien comme suit:

$$\% \text{ écart} = \frac{|\text{Tech Présent} - \text{Algorithme}|}{\text{Tech Présent}} \times 100\% \quad (6.2)$$

Si ce pourcentage d'écart est égal ou inférieur à 5%, il sera considéré qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les valeurs.

### 6.1.2 Brouillard givrant

Le tableau 6.1 présente les temps d'endurance déterminés par les méthodes expliquées ci-haut pour les essais de brouillard givrant WS8233 et WS8234. Lorsque la déviation standard est considérée, il n'y a pas d'écart significatif entre les temps d'endurance déterminés par l'algorithme et ceux déterminés par les techniciens en utilisant les photos.

Tableau 6.1: Temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de brouillard givrant.

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech Moyenne	Dév STD	Algorithme
	min	min	min	min
WS8233	85	82	11	80
WS8234	8	13	1	13

Toutefois, pour l'essai WS8234 particulièrement, il y a un écart considérable entre le temps d'endurance

déterminé par l'algorithme et celui du technicien présent lors de l'essai. En effet, comme le montre le Tableau 6.2, l'algorithme trouve un temps supérieur de 63%.

Tableau 6.2: Pourcentage d'écart entre les temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de brouillard givrant.

Nom de l'essai	Écart Tech Présent/Algorithme %	Écart Tech Moyenne/Algorithme %
WS8233	6	2
WS8234	63	0

Donc, l'algorithme détermine correctement les temps d'endurance pour les deux essais de brouillard givrant effectués lorsque ces temps sont comparés à ceux déterminés par les trois techniciens qui ont utilisés les photos (Tableau 6.3). Toutefois, l'algorithme n'a pas déterminé correctement les temps d'endurance lorsque ces temps sont comparés à ceux déterminés par le technicien présent lors des essais.

Tableau 6.3: Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour les essais de brouillard givrant.

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech Moyenne
WS8233	✗	✓
WS8234	✗	✓

### 6.1.3 Pluie verglaçante légère

Le tableau 6.4 présente les temps d'endurance déterminés par les différentes méthodes pour les essais d'endurance à la pluie verglaçante légère LZRB001, LZRB002, LZRB003, LZRB004, LZRB006 et LZRB007.

Tableau 6.4: Temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de pluie verglaçante légère.

Nom de l'essai	Tech Présent min	Tech Moyenne min	Dév STD min	Algorithme min
LZRB001	60	51	1	51
LZRB002	70	58	2	55
LZRB003	152	122	1	- <sup>1</sup>
LZRB004	74	83	2	-(29% à 85) <sup>2</sup>
LZRB006	115	114	0	112
LZRB007	61	61	10	63

<sup>1</sup> L'algorithme n'observe pas le critère d'échec avec les photos disponibles.

<sup>2</sup> L'algorithme détermine que 29% de la plaque est givrée à 85 minutes, moment auquel l'appareil photo a été arrêté.

Considérant la déviation standard, il n'y a pas d'écart significatif entre les temps d'endurance évalués par les techniciens scientifiques à l'aide des photos et ceux trouvés par l'algorithme pour les essais LZRB001 et LZRB007.

De plus, l'écart entre les temps trouvés par ces deux méthodes (Tableau 6.5) n'est pas significatif pour les essais LZRB002 (5%), LZRB004 (3%) et LZRB006 (2%).

Tableau 6.5: Pourcentage d'écart entre les temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de pluie verglaçante légère.

Nom de l'essai	Écart Tech Présent/Algorithme %	Écart Tech Moyenne/Algorithme %
LZRB001	15	0
LZRB002	21	5
LZRB003	-	-
LZRB004	16	4
LZRB006	3	2
LZRB007	3	3



L'algorithme donne donc des résultats intéressants pour ce type d'essai à partir des photos qui lui sont fournies. De plus, il est possible de constater qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les temps d'endurance trouvés par l'algorithme et ceux par le technicien présent pour les essais LZRB006 et LZRB007. Toutefois, le pourcentage d'écart est considérable pour les trois autres essais soit LZRB001, LZRB002 et LZRB004.

Un problème technique a fait en sorte que les photos après 122 minutes du début de l'essai LZRB003 ne sont pas disponibles. À ce moment, l'algorithme évalue que 26% de la plaque est givrée alors que les techniciens ayant utilisés les photos constatent le critère d'échec. Par contre, le technicien présent ne déclare l'échec qu'après 152 minutes. L'algorithme aurait probablement obtenu un résultat entre ces deux temps s'il n'y avait eu de problème technique.

En conclusion, l'algorithme détermine correctement les temps d'endurance pour les 5 essais de pluie verglaçante légère effectués lorsque ces temps sont comparés à ceux déterminés par les trois techniciens qui ont utilisés les photos (Tableau 6.6). Toutefois, l'algorithme n'a déterminé correctement les temps d'endurance lorsque ces temps sont comparés à ceux déterminés par le technicien présent que pour 2 des 5 essais, soit LZRB006 et LZRB007.

Tableau 6.6: Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour les essais de pluie verglaçante légère.

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech Moyenne
LZRB001	✗	✓
LZRB002	✗	✓
LZRB003	-	-
LZRB004	✗	✓
LZRB006	✓	✓
LZRB007	✓	✓

#### 6.1.4 Neige

Le Tableau 6.7 présente les temps d'endurance déterminés par les différentes méthodes pour les essais d'endurance à la neige SNWH473, SNWH475, SNWH476, SNWH477, SNWH478 et SNWH479.

Tableau 6.7: Temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de neige.

Nom de l'essai	Tech Présent min	Tech Moyenne min	Dév STD min	Algorithme min
SNWH473	72	76	4	77
SNWH475	71	67	1	70
SNWH476	29	25	3	32
SNWH477	29	35	5	- (29% à 44) <sup>1</sup>
SNWH478	32	40	5	45
SNWH479	30	37	6	40

<sup>1</sup> L'algorithme détermine que 29% de la plaque est recouverte de neige blanche à 44 minutes, moment auquel l'appareil photo a été arrêté.

Considérant la déviation standard, il n'y a pas d'écart significatif entre les temps d'endurance évalués par les techniciens scientifiques à l'aide des photos et ceux trouvés par l'algorithme pour les essais SNWH473, SNWH478 et SNWH479.

De plus, comme le montre le Tableau 6.8, le pourcentage d'écart entre ces deux méthodes pour l'essai SNWH475 est de 5% c'est-à-dire que l'écart n'est pas significatif pour cet essai. Toutefois, le pourcentage d'écart entre ces deux méthodes est élevé pour les essais SNWH476 et SNWH477.

Aussi, le pourcentage d'écart montre que l'écart n'est pas significatif entre les temps d'endurance déterminés par le technicien présent et l'algorithme pour l'essai SNWH475. Toutefois, le pourcentage d'écart entre ces deux valeurs est considérable pour tous les autres essais.

Tableau 6.8: Pourcentage d'écart entre les temps d'endurance obtenus par les techniciens scientifiques et l'algorithme pour les essais de neige.

Nom de l'essai	Écart Tech Présent/Algorithme %	Écart Tech Moyenne/Algorithme %
SNWH473	7	1
SNWH475	1	5
SNWH476	10	28
SNWH477	55	29
SNWH478	41	13
SNWH479	33	8

Donc, en considérant la déviation standard et le pourcentage d'écart, l'algorithme détermine correctement les temps d'endurance pour quatre essais de neige effectués sur six lorsque ces temps sont comparés à ceux déterminés par les trois techniciens qui ont utilisés les photos (Tableau 6.9). Cependant, l'algorithme a déterminé correctement le temps d'endurance pour un seul des essais lorsque ces temps sont comparés à ceux déterminés par le technicien présent lors de l'expérimentation.

Tableau 6.9: Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour les essais de neige.

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech Moyenne
SNWH473	✗	✓
SNWH475	✓	✓
SNWH476	✗	✗
SNWH477	✗	✗
SNWH478	✗	✓
SNWH479	✗	✓

## **6.2 Discussion**

### **6.2.1 Analyse des résultats**

Les tableaux 6.10 et 6.11 synthétisent les résultats obtenus par les algorithmes pour l'ensemble des essais de brouillard givrant, de pluie verglaçante légère et de neige effectués. Le tableau 6.11 démontre s'il y a un écart significatif (échec) ou s'il n'y a pas d'écart significatif (réussite) entre les temps d'endurance obtenus par les algorithmes et ceux obtenus par le technicien présent lors des essais ainsi que la moyenne de ceux obtenus par les trois techniciens à partir des photos.

Tableau 6.10: Temps d'endurance obtenus par les techniciens et l'algorithme pour tous les essais.

Nom de l'essai	Tech Présent min	Tech Moyenne min	Algorithme min
WS8233	85	82	80
WS8234	8	13	13
LZRB001	60	51	51
LZRB002	70	58	55
LZRB003	152	122	- <sup>1</sup>
LZRB004	74	83	- (29% à 85) <sup>2</sup>
LZRB006	115	114	112
LZRB007	61	61	63
SNWH473	72	76	77
SNWH475	71	67	70
SNWH476	29	25	32
SNWH477	29	35	- (29% à 44) <sup>3</sup>
SNWH478	32	40	45
SNWH479	30	37	40

<sup>1</sup> L'algorithme n'observe pas le critère d'échec avec les photos disponibles.

<sup>2</sup> L'algorithme détermine que 29% de la plaque est givrée à 85 minutes, moment auquel l'appareil photo a été arrêté.

<sup>3</sup> L'algorithme détermine que 29% de la plaque est recouverte de neige blanche à 44 minutes, moment auquel l'appareil photo a été arrêté.

Tableau 6.11: Réussite (✓) ou échec (✗) de l'algorithme à déterminer correctement le temps d'endurance pour tous les essais.

Nom de l'essai	Tech Présent	Tech Moyenne
WS8233	✗	✓
WS8234	✗	✓
LZRB001	✗	✓
LZRB002	✗	✓
LZRB003	-	-
LZRB004	✗	✓
LZRB006	✓	✓
LZRB007	✓	✓
SNWH473	✗	✓
SNWH475	✓	✓
SNWH476	✗	✗
SNWH477	✗	✗
SNWH478	✗	✓
SNWH479	✗	✓

Tel que présenté par le tableau 6.12, lorsque les temps d'endurance des algorithmes sont comparés à ceux du technicien présent lors des essais, les algorithmes ont déterminés correctement le temps d'endurance pour seulement 3 essais sur une possibilité de 13.

Les résultats sont nettement meilleurs lorsque les temps d'endurance des algorithmes sont comparés à la moyenne de ceux déterminés avec les photos. En effet, dans ce cas, les algorithmes ont déterminés correctement le temps d'endurance de 11 essais sur une possibilité de 13.

Tableau 6.12: Compte des réussites et échecs des algorithmes pour la détermination du temps d'endurance.

	Tech Présent	Tech Moyenne
Réussite	3	11
Échec	10	2
Indéterminé	1	1
Total	14	14

### 6.2.2 Causes d'erreurs

La cause d'erreur la plus importante est la réflexion de la lumière sur la plaque d'essai. Lorsque ces réflexions sont fixes, un filtre homomorphe a aidé à réduire considérablement ce problème. Cependant, dans le cas des essais de neige, le dispositif servant à disperser la neige se déplace au-dessus de la plaque d'essai tout en réfléchissant la lumière. Ces réflexions sont très intenses et blanches et changent constamment de position. Non seulement ne faut-il pas que l'algorithme détecte ces réflexions comme de la neige blanche qu'il essaie de détecter, mais elles rendent également une partie non négligeable de la plaque inaccessible pour un temps puisque complètement blanche (figure 6.1).

Cette cause d'erreur est probablement responsable du fait que les deux seuls échecs dans la détermination du temps d'endurance de l'algorithme par rapport aux techniciens scientifiques ayant utilisé les photos sont des essais de neige.



Figure 6.1: Réflexions sur la plaque lors d'un essai de neige.

Une autre cause d'erreur découle de l'utilisation du filtre de Kalman. Il est nécessaire de filtrer les images en raison des précipitations en train de tomber sur la plaque qu'il ne faut pas détecter comme étant du givre. Le filtre de Kalman est particulièrement efficace pour éliminer ces bruits soudains.

Cependant, une conséquence non désirable de son utilisation est lorsque le givre progresse rapidement. Lors des premiers instants de cette progression, le filtre interprète le changement brusque comme du bruit. L'algorithme prend alors un peu plus de temps avant que la partie givrée apparue rapidement ne soit détectée.



### 6.2.3 Variabilité des temps d'endurance

Les tableaux 6.1, 6.4 et 6.7 mettent en évidence que pour la plupart des essais, il y a une différence significative entre le temps d'endurance déterminé par le technicien présent lors de l'essai et celui déterminé par les techniciens en utilisant les photos. De fait, afin de déterminer si les photos permettent une interprétation juste de la réalité, il serait pertinent de vérifier lors de l'essai si, pour un même technicien, l'inspection visuelle de la plaque donne le même temps d'endurance qu'avec les photos. D'une part, l'appareil photo est plus près de la plaque d'essai que le technicien présent, ce qui pourrait faciliter la détection du givre. D'autre part, les photos contiennent des artefacts qui pourraient nuire à la détection du givre et ainsi donner l'avantage au technicien présent lors de l'essai.

Sans faire plus de recherche, il est difficile de savoir lequel des temps d'endurance, entre celui déterminé en présence par un seul technicien et celui déterminé avec les photos par trois techniciens, est le plus près de la réalité. Toutefois, il est possible de constater que les algorithmes donnent des résultats équivalents à l'humain pour la plupart des essais si seulement les photos sont utilisés. Donc, si la différence entre les temps d'endurance déterminés en présence par rapport à ceux déterminés avec les photos s'explique par un problème avec celles-ci, il est possible de croire qu'en améliorant leur qualité, les algorithmes développés seraient en mesure de déterminer des temps d'endurance équivalents à ceux de techniciens présents lors des essais.

De plus, les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 montrent qu'en général, en utilisant les mêmes photos, différents techniciens scientifiques déterminent des temps d'endurance différents. Par exemple, un écart de 21 minutes dans le temps d'endurance est observé pour l'essai WS8233. Ces écarts sont à prévoir étant donné que, d'une part, l'évaluation visuelle des parties givrées est subjective et que, d'autre part, la zone d'échec (pour WSET) ou le pourcentage d'aire givré (pour LZR et SNW) doivent être estimés mentalement par les techniciens scientifiques.

#### **6.2.4 Objectivité**

Afin de préserver l'objectivité au moment de la conception du logiciel, les temps d'endurance étaient inconnus. L'objectif était de détecter correctement le givre, d'évaluer le critère d'échec et de déterminer ainsi le temps d'endurance du fluide antigivre plutôt que de produire un programme qui essayerais d'obtenir les temps d'endurance déterminés par les techniciens scientifiques du LIMA.

De plus, les temps d'endurance déterminés par les trois techniciens scientifiques à partir des photos ont été obtenus de manière indépendante par ceux-ci.

#### **6.2.5 Limites**

Ce qui limite la détermination automatisée du temps d'endurance de façon importante est la capacité d'obtenir des photographies de bonne qualité. Premièrement, l'appareil photo placé dans la chambre climatique est exposé aux précipitations. Sur certaines photos, par exemple, il y a des gouttes d'eau sur la lentille (Figure 6.2).



Figure 6.2: Goutte d'eau sur la lentille.

De plus, l'appareil photo est placé assez loin de la plaque pour ne pas interférer avec l'essai et ne peut être orthogonale à celle-ci en raison du montage expérimental. D'ailleurs, les résultats obtenus montrent une différence significative entre les temps d'endurance obtenus par un technicien présent lors des essais et ceux obtenus par des techniciens qui ont utilisé les photos de ces essais. Il faudra déterminer si cette différence est causée par la qualité des photos et, si c'est le cas, améliorer la qualité de celles-ci jusqu'à trouver le même temps d'endurance en présence qu'avec les photos.

Aussi, les données expérimentales utilisées pour la vérification des algorithmes sont les mêmes que celles utilisées pour leur élaboration. Bien que les temps d'endurance n'étaient pas connus préalablement, il serait pertinent de valider les temps d'endurance obtenus par ces algorithmes en utilisant d'autres données expérimentales. En effet, il faudrait vérifier que les algorithmes donnent des résul-

tats comparables à ceux d'un humain pour d'autres essais pour lesquels les conditions expérimentales varient (lumière, caméra, fluide, etc.) afin de vérifier que les paramètres ne sont pas surajustés.

Bien que l'objectif des algorithmes soit de déterminer le temps d'endurance, il serait pertinent de vérifier que ceux-ci identifient les mêmes parties givrées sur la plaque d'essai que les techniciens scientifiques. En effet, dans ce travail de recherche, la performance des algorithmes pour la détection du givre n'a pas été évaluée. Pour ce faire, chacun des techniciens scientifiques pourrait identifier les zones qu'il considère givrées sur la photo du moment de l'échec. Par la suite, des images synthétisant l'ensemble des photos des techniciens seraient créées. Celles-ci seraient divisées en trois classes de zones : les zones qu'ils considèrent tous comme givrées, les zones qu'ils considèrent tous comme non givrées et les zones que certains considèrent givrées et d'autres pas, au moment de l'échec.

Afin d'évaluer la performance des algorithmes proposés pour la détection automatisée du givre, les zones considérées givrées par les techniciens scientifiques seraient comparées aux images binaires givrée/non-givrée produites par le logiciel. Le pourcentage de givre détecté par le logiciel et par au moins un des techniciens scientifiques serait calculé. Puis, le pourcentage de givre non détecté par le logiciel mais identifié par tous les techniciens serait donné. Finalement, le pourcentage de faux positifs, c'est-à-dire du givre détecté par le logiciel mais par aucun des techniciens serait présenté.

Cette méthode permettrait de vérifier que les algorithmes donnent des temps d'endurance valide parce qu'ils détectent le givre correctement.

### **6.2.6 Améliorations**

Afin d'améliorer les résultats, il est nécessaire de trouver des solutions aux causes d'erreurs. Pour les essais de neige, il faut trouver une façon d'éliminer les réflexions causées par le dispositif servant

à disperser la neige sur la plaque. Pour ce faire, celui-ci pourrait être peinturé avec une peinture mate ou recouvert d'un matériau ne réfléchissant pas la lumière.

Pour les essais de pluie verglaçante légère, il faut améliorer l'uniformité de l'éclairage sur la plaque pour éliminer le cercle de lumière visible dans les images. L'utilisation de diffuseur de lumière, comme dans un studio de photographie, pourrait accomplir cet objectif. De plus, un filtre polariseur peut être placé devant la source de lumière et un autre devant la caméra. En modifiant l'orientation angulaire de ceux-ci, il serait possible d'éliminer la réflexion de la source dans la photo.

Afin de réduire l'impact qu'à le filtre de Kalman sur la détection des zones givrées se formant rapidement, des valeurs plus faibles pour le gain de Kalman ( $G$ ) pourraient être utilisées de façon à filtrer de façon moins agressive. Cependant, réduire le gain de Kalman risque d'entraîner la détection de faux positifs, c'est-à-dire des précipitations qui seraient détectées comme du givre.

Aussi, si les précipitations sont appliquées à intervalle régulier, l'intervalle de la prise de photos pourrait être ajusté en conséquence de façon à ne pas prendre de photos lorsqu'il y a des précipitations. Dans ce cas, le filtre de Kalman pourrait ne plus être nécessaire ou encore il serait possible de diminuer le gain.

## Chapitre 7

# Conclusions et recommandations

### 7.1 Conclusions

Une méthode automatisée permettant de déterminer le temps d'endurance de fluides antigivre de type II, III et IV par traitement d'images à été élaboré pour trois types d'essais : les essais d'endurance au brouillard givrant, les essais d'endurance à la pluie verglaçante légère et les essais d'endurance à la neige.

Pour ce faire, un algorithme différent pour chacun de ces types d'essais a été créé afin de détecter le givre sur la plaque d'essais et d'évaluer le critère d'échec respectif à partir des images prises par un appareil photo automatiquement et à intervalle régulier. Ces algorithmes ont été implémenté à l'aide de MATLAB.

Afin de développer ces algorithmes et d'évaluer la validité de leurs résultats, 2 essais WSET, 7 essais LZR et 7 essais SNW ont été réalisés dans les chambres climatiques du LIMA en utilisant le montage expérimental prescrit.

Les temps d'endurance obtenus par les algorithmes ont été comparés avec les temps d'endurance déterminés par le technicien scientifique présent lors des essais. Des 13 essais pour lesquels les images ont pu être utilisées, le temps d'endurance déterminé par les algorithmes n'était valide que pour 3 d'entre eux, c'est-à-dire qu'il y avait un écart de moins de 5% entre le temps d'endurance déterminé par le technicien présent et celui produit par le programme MATLAB.

De plus, un groupe de trois techniciens scientifiques ont déterminés les temps d'endurance de ces essais à partir des photos de ceux-ci. Les moyennes de ces temps d'endurance et leur déviation standard ont été calculé. Les temps d'endurance obtenus par les algorithmes ont ensuite été comparés avec ces valeurs moyennes.

Des 13 essais pour lesquels les images ont pu être utilisées, le temps d'endurance trouvé par les algorithmes était valide pour 11 d'entre eux, c'est-à-dire que soit il était à l'intérieur d'une déviation standard de la moyenne des techniciens, soit il y avait un écart de moins de 5% entre ceux-ci.

Les 2 essais pour lesquels le temps d'endurance trouvé par les algorithmes n'était pas valide étaient des essais de neige. Pour ces essais, un problème important de réflexion de lumière sur la plaque diminuait la qualité des photos.

En conclusion, les algorithmes développés sont efficaces pour déterminer le temps d'endurance de fluides antigivre lorsque ce temps d'endurance est comparé à celui déterminé par les techniciens scientifiques ayant utilisés les mêmes données : les photos. Cependant, pour une raison qui pourra être explorée dans des travaux futurs, les algorithmes se sont montrés inefficaces pour déterminer le temps d'endurance lorsque celui-ci est comparé à celui constaté par le technicien présent lors de l'essai.

## 7.2 Recommandations

Les principales recommandations à tirer de cette étude pour la poursuite de travaux connexes sont les suivantes :

- Améliorer la qualité des photos en particulier les problèmes d'uniformité de l'éclairage et les réflexions.
- Vérifier s'il y a une différence systématique entre le temps d'endurance déterminé par un technicien scientifique présent lors de l'essai par rapport à celui déterminé en utilisant les photos. S'il y a une différence, vérifier si elle peut être contrée par l'amélioration de la qualité des photos.
- Effectuer plus d'essais pour valider la généralité des algorithmes développés.
- Développer une plateforme expérimentale rassemblant les trois algorithmes pour uniformiser le traitement des images des différents types d'essais.



# Bibliographie

- [1] M. Bragg, G. Gregorek, « An analytical evaluation of the icing properties of several low and medium speed airfoils », 21st Aerospace Sciences Meeting, 1983.
- [2] K. Mikkelsen, R. Mcknight, R. Ranaudo, and P. Perkins, Jr., «Icing flight research - Aerodynamic effects of ice and ice shape documentation with stereo photography», in 23rd Aerospace Sciences Meeting, Reno,NV,U.S.A., 1985.
- [3] Transport Canada, “Aircraft Critical Surface Contamination Training For Aircrew and Groundcrew.pdf,” 2004. [Online]. Available: <http://www.tc.gc.ca/publications/en/tp10643/pdf/hr/tp10643e.pdf>. [Accessed: 23-May-2019].
- [4] Myron M. Oleskiw, “Full-Scale Wind-Tunnel Simulation of Takeoff Performance Degradation with Contaminated Fluid Runback.pdf.”, Transport Canada.
- [5] SAE Aerospace (2017). « Endurance Time Test Procedures for SAE Type II/III/IV Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids » (ARP5485B), SAE International.
- [6] SAE Aerospace (2018), « Deicing/Anti-Icing Fluid, Aircraft SAE Type I », (AMS1424P).
- [7] SAE Aerospace, (2018), « Fluid, Aircraft Deicing/Anti-Icing, Non-Newtonian (Pseudoplastic), SAE Types II, III, and IV », (AMS1428K).

- [8] J. M. Thériault, R. E. Stewart, and W. Henson, “On the Dependence of Winter Precipitation Types on Temperature, Precipitation Rate, and Associated Features,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 49, no. 7, pp. 1429–1442, Jul. 2010.
- [9] J. M. Wallace, P. V. Hobbs, « *Atmospheric Science* », Academic Press, 2006.
- [10] Beisswenger, A. et Laforte, J.L. (2003). *Endurance and Aerodynamic Performance Certification of Aircraft De/Anti-icing Fluid*, SAE International.
- [11] Ville de Montréal, « Précipitations de pluie et de neige ». En ligne: [http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=6897,67875651\\_dad=portal\\_schema=PORTAL](http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6897,67875651_dad=portal_schema=PORTAL). Consulté le 19 juin 2019.
- [12] J. V. Cortinas Jr., B. C. Bernstein, C. C. Robbins, and J. Walter Strapp, « An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada: 1976–90 », *Weather and Forecasting*, vol. 19, no. 2, pp. 377–390, Apr. 2004.
- [13] SAE Aerospace (2019). « Water Spray and High Humidity Endurance Test Methods for SAE AMS 1424 and SAE AMS 1428 Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids », AS5901D.
- [14] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, *Digital Image Processing*, Pearson Prentice Hall, 2008
- [15] J. Canny, «A Computational Approach to Edge Detection», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 6 p. 679-698, Nov. 1986.
- [16] Solomon C., Breckon T., *Fundamentals of Digital Image Processing..A practical Approach with Examples in Matlab*, Wiley, 2011.
- [17] S. Lakshmanan, C. Mythili, and V. Kavitha, «Kalman Filtering Technique For Video Denoising Method», *International Journal of Computer Applications*, vol. 43, no. 20, pp. 10-13, Apr. 2012.

- [18] C.P. Mauer (2011). «Kalman Filter.» En ligne: <https://imagej.nih.gov/ij/plugins/kalman.html>.  
Consulté le 29 novembre 2018.
- [19] R. Campbell (2009). « Kalman filter for noisy movies », En ligne:  
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26334-kalman-filter-for-noisy-movies>.  
Consulté le 7 septembre 2019.
- [20] I. Pitas and A. N. Venetsanopoulos, « Nonlinear Digital Filters: Principles and Applications »,  
Eds. Boston, MA: Springer US, 1990.
- [21] P. Kovesi, « Computer Vision and Image Processing ». En ligne: <https://www.peterkovesi.com/>.  
Consulté le 28 mai 2019.

## **Appendix A**

### **Photos au moment de l'échec**

Cette annexe présente les photos au moment de l'échec déterminé par les algorithmes ainsi que l'image binaire givrée/non-givrée correspondante.

## A.1 Essais de brouillard verglaçant

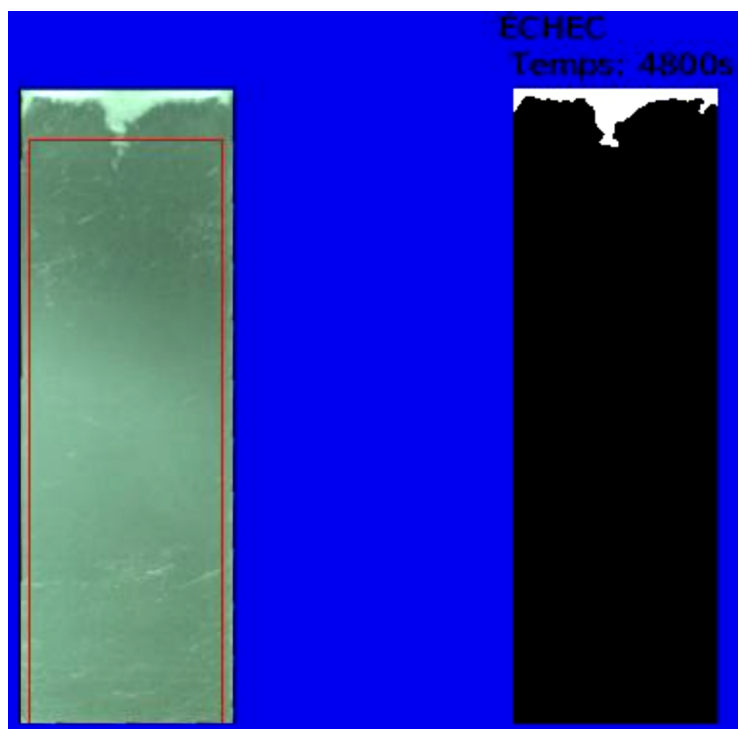


Figure A.1: WS8233.

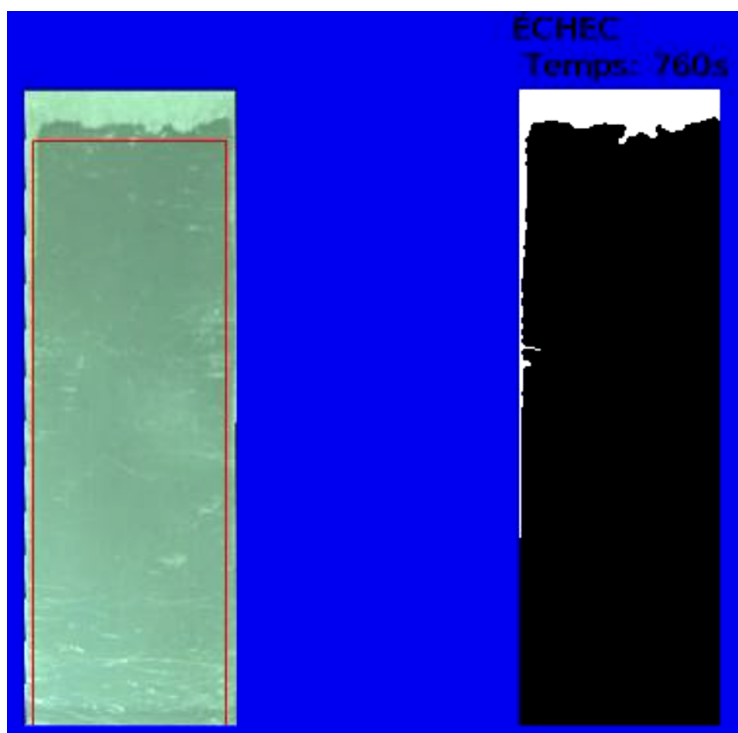


Figure A.2: WS8234.

## A.2 Essais de pluie verglaçante légère

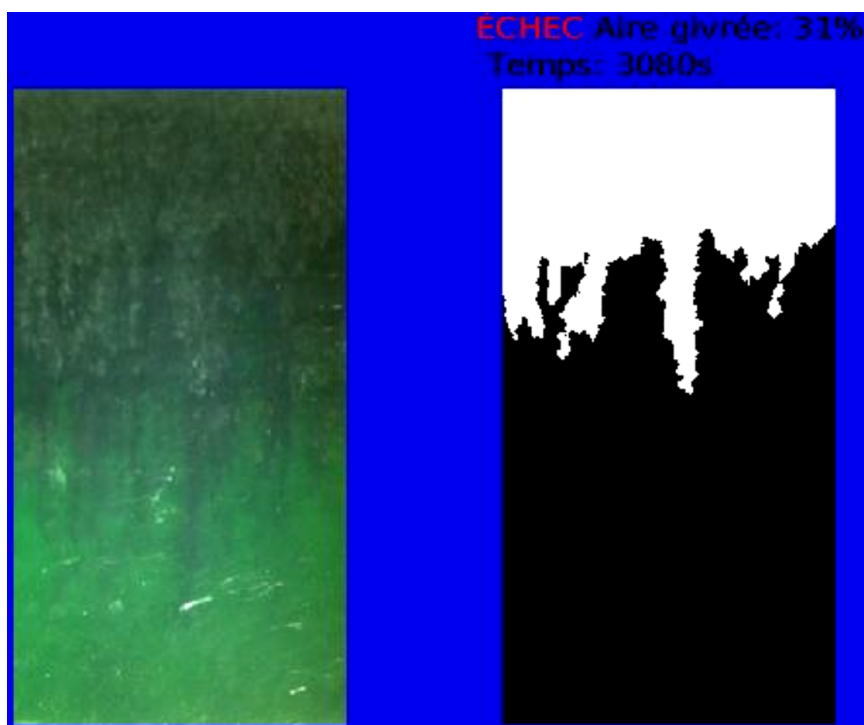


Figure A.3: 18LZRB001.

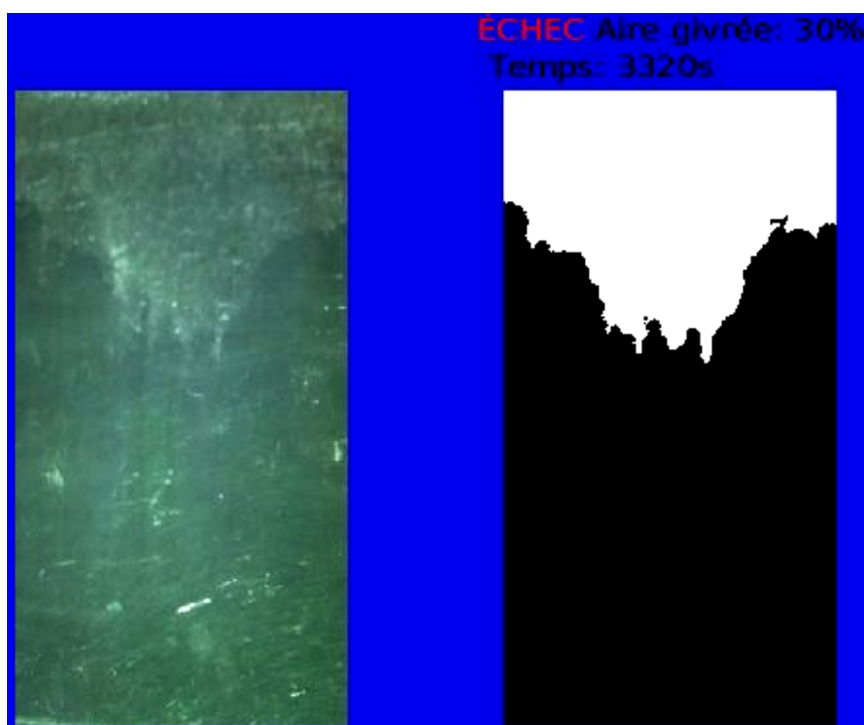


Figure A.4: 18LZRB002.

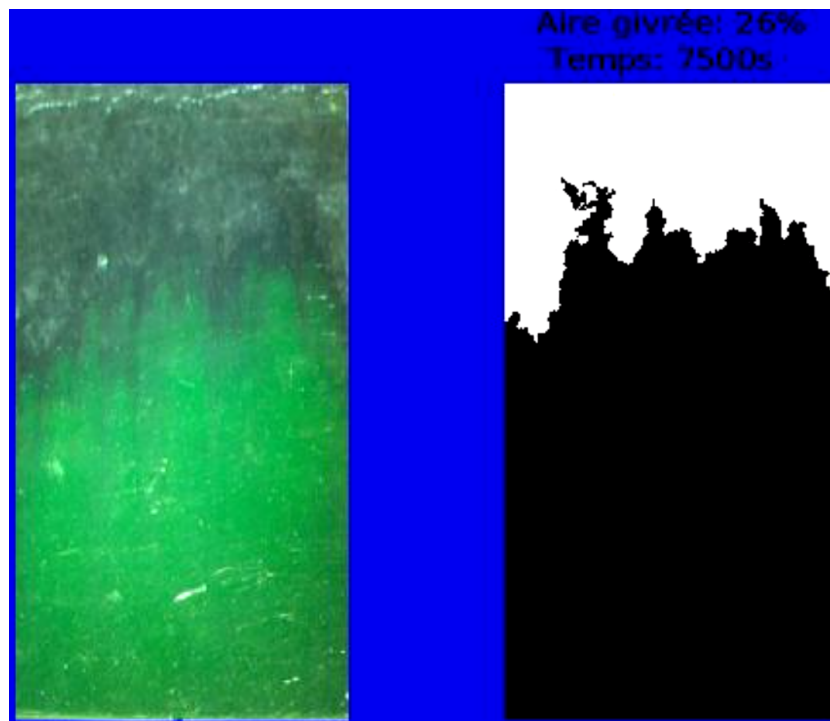


Figure A.5: 18LZRB003.

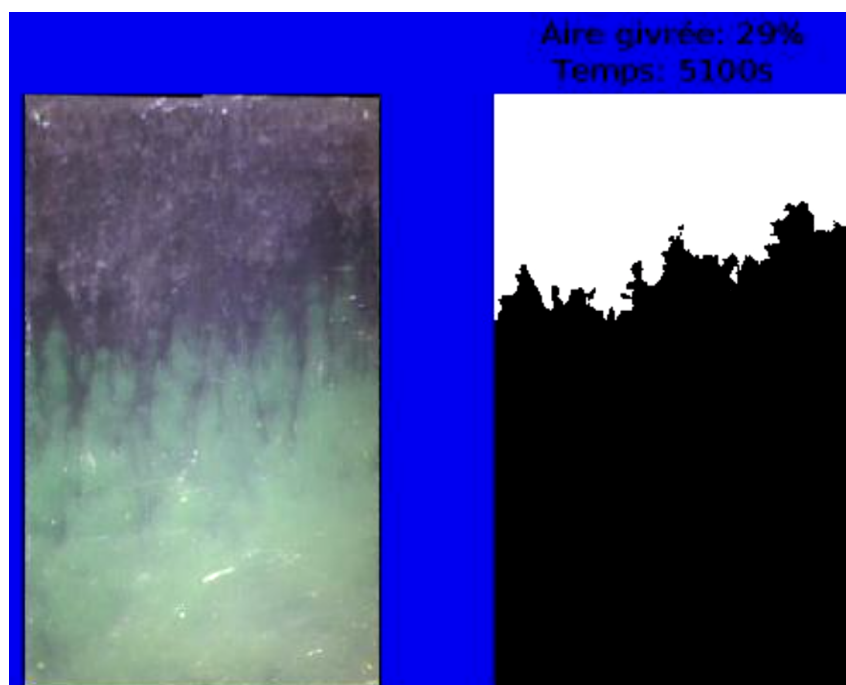


Figure A.6: 18LZRB004.

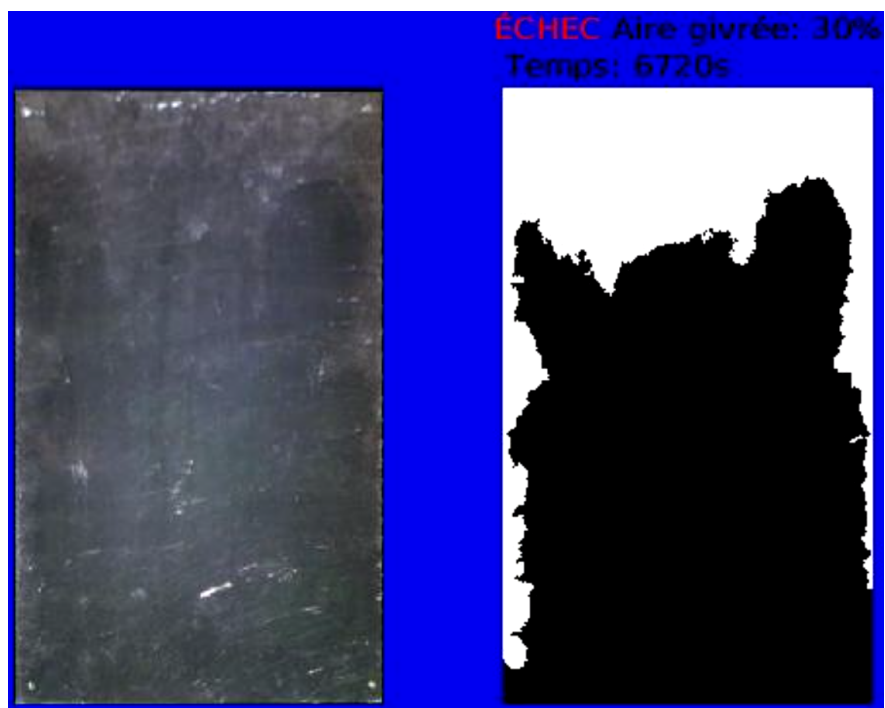


Figure A.7: 18LZRB006.

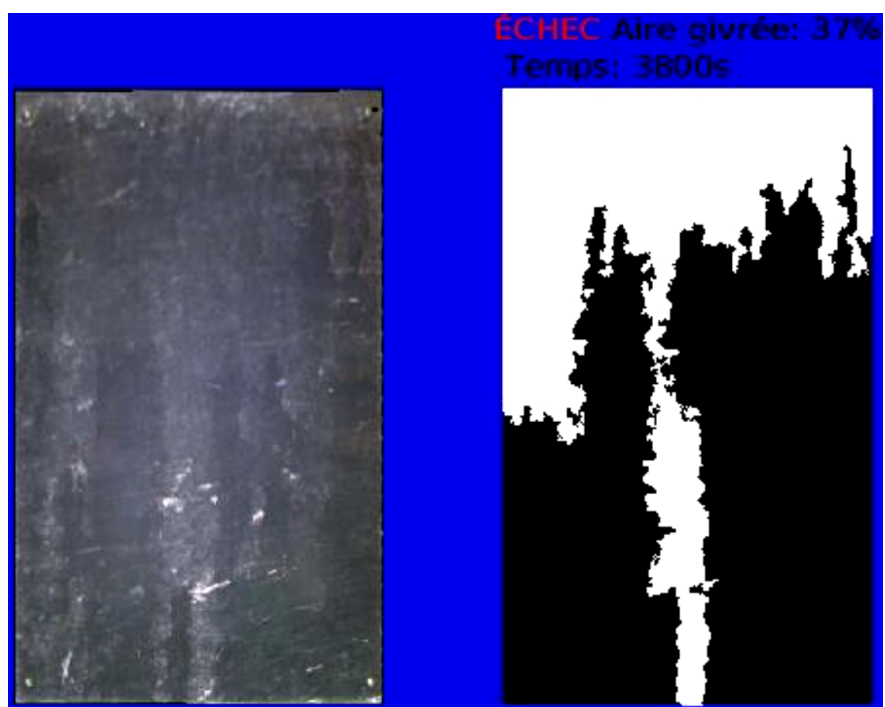


Figure A.8: 18LZRB007.



### A.3 Essais de neige

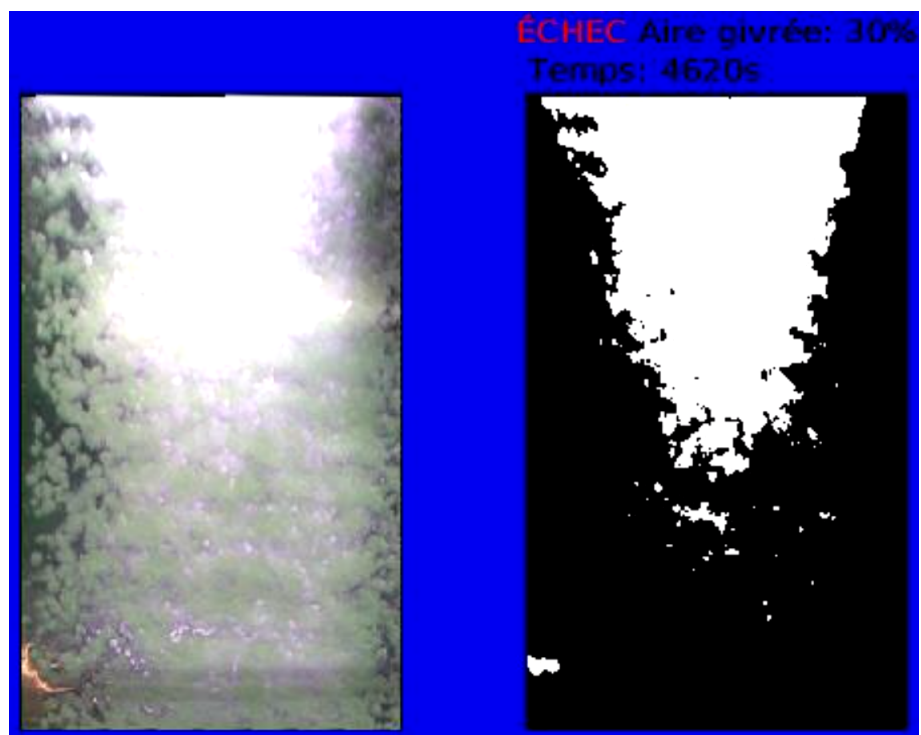


Figure A.9: SNWH473.

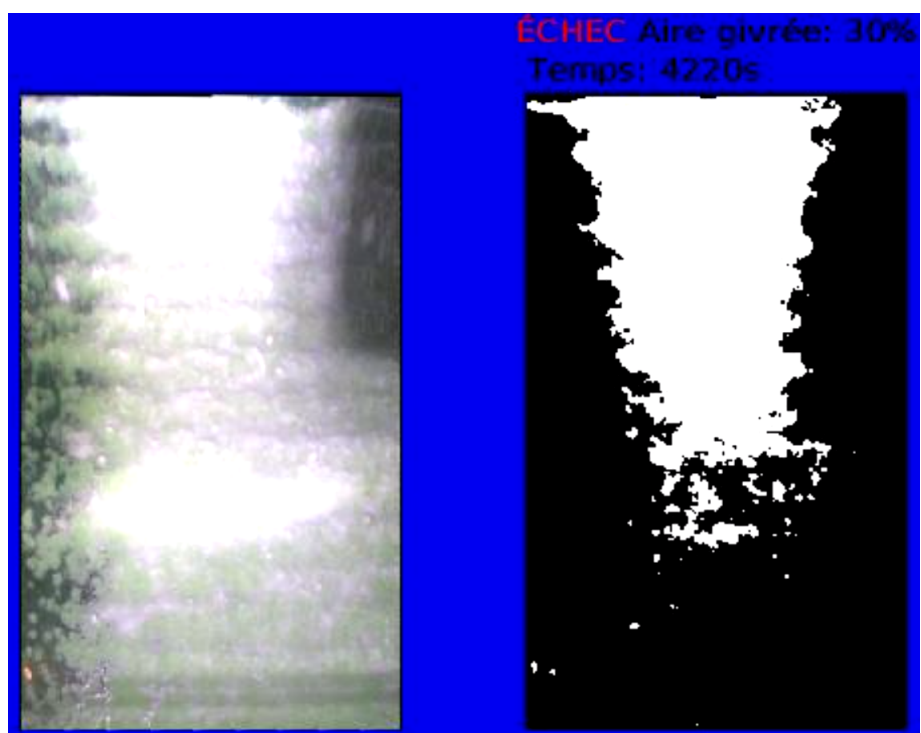


Figure A.10: SNWH475.

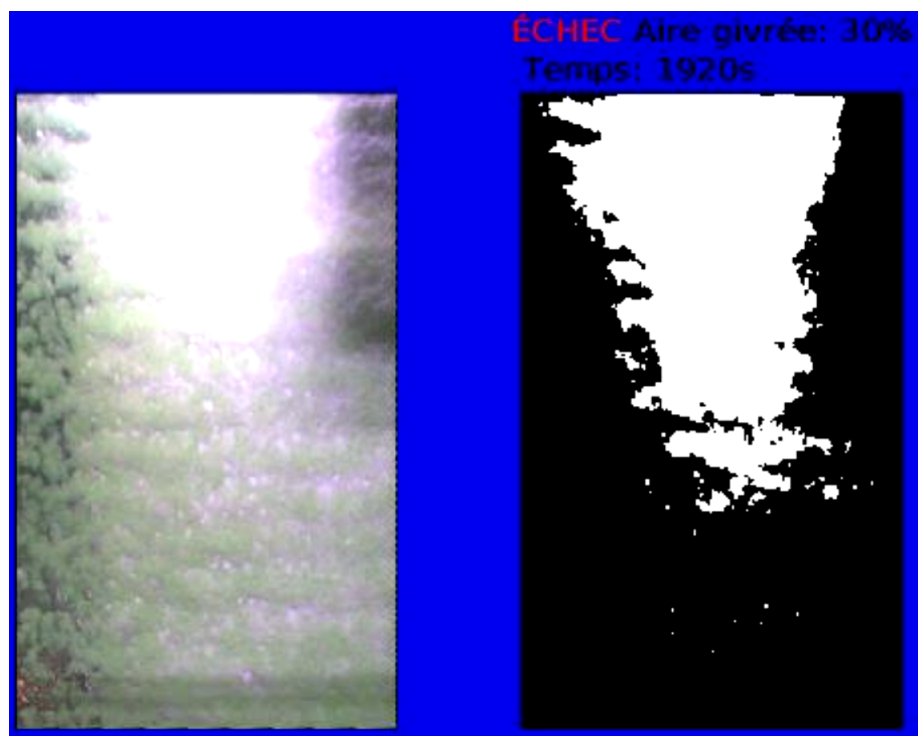


Figure A.11: SNWH476.

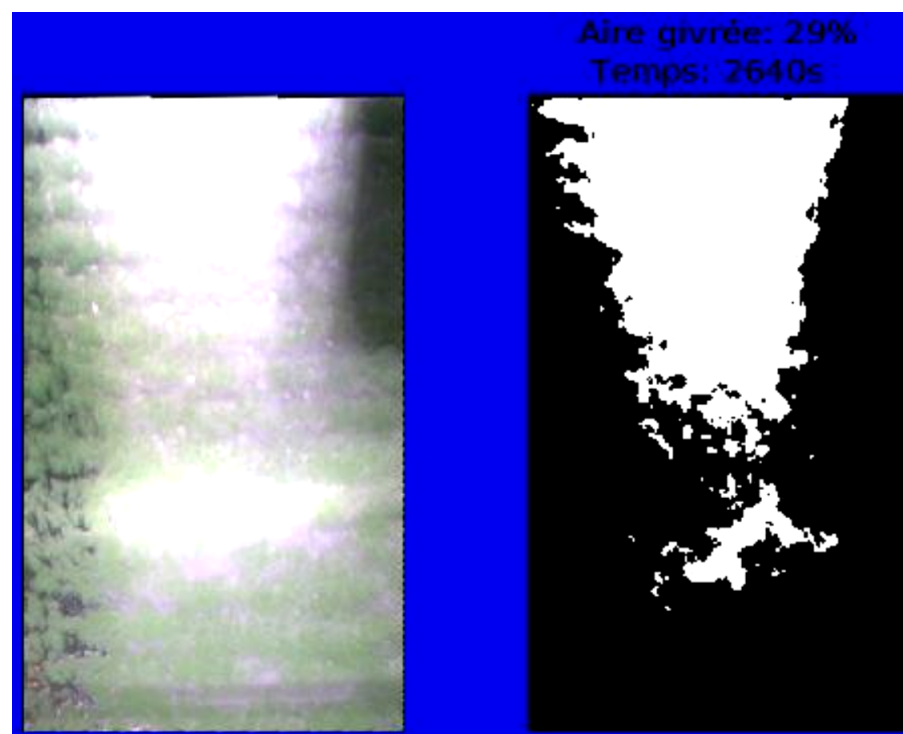


Figure A.12: SNWH477.

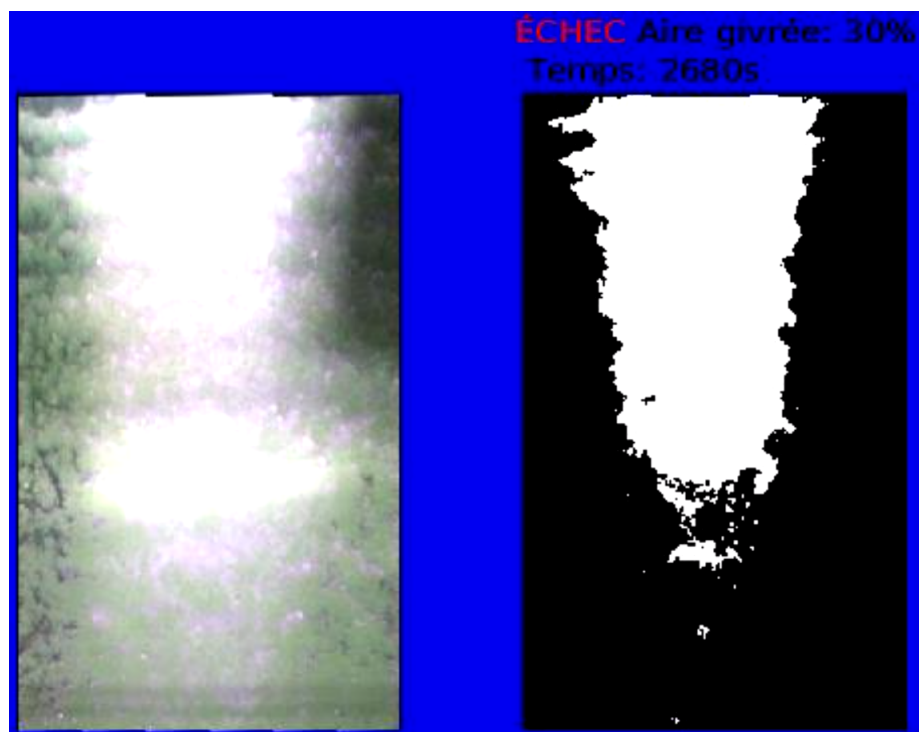


Figure A.13: SNWH478.

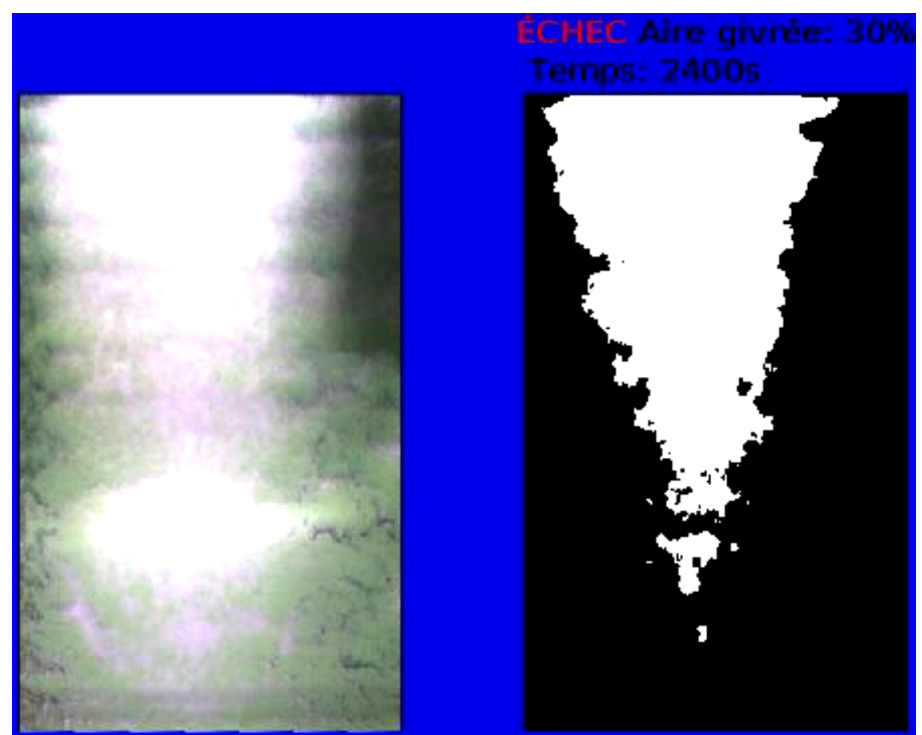


Figure A.14: SNWH479.

## Appendix B

# Code MATLAB

### B.1 Détection du givre pour les essais WSET

```
%%%%%%%%%%  
% WSET %  
%%%%%%%%%%  
  
% Pour chacun des répertoires d'essais, l'algorithme de détection  
% du givre pour les essais WSET est appliqué et le critère d'échec  
% évalué. Une vidéo montrant l'évolution dans le temps de l'image  
% réelle, du givre détecté, le temps écoulé et la zone d'échec est  
% affichée et enregistrée. Un message apparaît lorsque le critère  
% d'échec est observé.  
  
% Initialisation  
clear all;  
  
basePath = '/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/data/';  
  
% Répertoires des essais  
essai.a = 'WS8233/';  
essai.b = 'WS8234/';  
  
noms = fieldnames(essai);  
  
% Boucle sur les essais  
for e = 1:length(noms)
```

```

% Initialisation de la vidéo
v = VideoWriter(['/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/detection'essai.(no
v.FrameRate = 3;
open(v);

essaiPath = essai.(noms{e});
plaquePath = [basePath essaiPath 'plaque/'];

% images de la plaque seulement
images = imageSet(plaquePath, 'recursive');

se = strel('disk', 4); % forme circulaire de diamètre 4 pixels
                        % pour opérations morphologiques

% Initialisation
stack = [];
temps = 0;
I = images(1).read(1);

% Nombre d'image dans la séquence
N = images(1).Count;

% Dimensions de l'image
largeur = length(I(1,:,1));
longueur = length(I(:, 1,1));

% Critères d'échec
% La zone d'échec commence à partir de 2.5cm du haut de la
% plaque et à 0.5cm de chaque côtés.
% Grandeur de la plaque: 10cm par 30cm
height = round(2.5/30*longueur);
width = round(.5/10*largeur);

% Boucle sur les images d'un essai
for i = 1:N
    I = images(1).read(i); % Lecture de la iième image

    orig = I;

    I = I(:,6:end-6,:); % arranger les côtés mal rognés

    % cumul est l'image segmentée sur laquelle le givre est blanc
    % (1) et le reste de la plaque est noir (0)
    if ~exist("cumul")
        cumul = zeros(length(I(:, 1,1)), length(I(1,:,1)));
    end
end

```

```

% Ajustement gamma
I = imadjust(I, [], [], 2);

% ajout de l'image actuelle à la séquence d'images
% utilisée par le filtre de Kalman pour prédire l'image suivante.
stack(:, :, i) = rgb2gray(I);

% Application d'un filtre de Kalman à la séquence
if i>30 % appliquer le filtre lorsqu'il y a suffisamment
    % d'images dans la séquence
    kalman = Kalman_Stack_Filter(stack, 0.7, 1);
    bin = kalman(:, :, i);

    % Détection des contours avec l'algorithme de Canny
    edges = edge(bin, 'Canny', [0.07 0.17]);

    % Accumuler les contours
    cumul = cumul + edges;
    cumul = logical(cumul); % 0 ou 1

    % Remplir les trous ajouter du blanc sur le tour de l'image pour
    % remplir les trous sur le périmètre
    cumul = padarray(cumul, [1 1], 1, 'pre'); % ajout ligne blanche en haut et colonne
    cumul = padarray(cumul, [0 1], 1, 'post'); % ajout colonne blanche à gauche
    cumul = imclose(cumul, se);
    cumul(end-10:end, width+1:largeur-width-1) = 0;
    cumul = imfill(cumul, 'holes');
    cumul = cumul(2:end, 2:end-1);

    % garder seulement la région principale
    cumul = bwareafilt(cumul, 1);

    subplot(1,2,1), imshow(orig);
    line([width width], [height longueur], 'color', 'red');
    line([largeur-width largeur-width], [height longueur], 'color', 'red');
    line([width largeur-width], [height height], 'color', 'red');
    subplot(1,2,2), imshow(cumul);

    % Vérifier s'il y a du givre à l'intérieur de la zone d'échec
    echec = sum(sum(cumul(height+1:end-10, width+1:largeur-width-1)));
    if echec
        title("ÉCHEC");
    end

    set(gcf, 'units', 'normalized', 'outerposition', [0 0 1 1]);
    frame = getframe(gcf);
    writeVideo(v, frame);

```

```

        pause(0.1);
    end

    temps = temps + 20;
end
close(v);
end

```

## B.2 Détection du givre pour les essais LZR

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% lzt.m %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Pour chacun des répertoires d'essais, l'algorithme de détection
% du givre pour les essais lzt est appliqué et le critère d'échec
% évalué. Une vidéo montrant l'évolution dans le temps de l'image
% réelle, du givre détecté, le temps écoulé et du pourcentage de la
% plaque givrée est affichée et enregistrée. Un message apparaît
% lorsque le critère d'échec est observé.

```

```

clear all;

```

```

basePath = '/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/data/';

```

```

% Répertoires des essais
essai.a = '18LZRB001/';
essai.b = '18LZRB002/';
essai.c = '18LZRB003/';
essai.d = '18LZRB004/';
essai.e = '18LZRB006/';
essai.f = '18LZRB007/';

```

```

noms = fieldnames(essai);

```

```

% Boucle sur les essais
for e = 1:length(noms)

```

```

    % Initialisation de la vidéo

```

```

    v = VideoWriter(['/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/detection' essai.(no
    v.FrameRate = 3;
    open(v);

```

```

    essaiPath = essai.(noms{e});
    plaquePath = [basePath essaiPath 'plaque/'];

```

```

% Images de la plaque seulement
images = imageSet(plaquePath, 'recursive');

I = images(1).read(1);

% Nombre d'image dans la séquence
N = images(1).Count;

% Dimensions de l'image
largeur = length(I(1,:,1));
longueur = length(I(:, 1,1));

% Initialisation
temps = 0;
aire = 0;
cumul = zeros(longueur, largeur);
cumulTot = zeros(longueur, largeur);

% Boucle sur les images d'un essai
for i = 1 : N
    I = images(1).read(i);
    orig = I;

    temps = temps + 20; % photos aux 20 secondes

    % Filtre gaussien
    I = imgaussfilt(I, 2);
    % Filtre homomorphique
    I = homomorphic(I, 2, .5, 2, 0, 5);

    % Estimation de l'arrière-plan
    alpha = 0.8;
    if i == 1
        background = I;
    else
        background = (1-alpha)* I + alpha * background;
    end

    % Soustraire l'arrière-plan à l'image
    diff = I - background;

    % Binarisation avec l'algorithme d'Otsu
    thresh = graythresh(diff);
    bin = im2bw(diff, thresh);

    % Accumuler les pixels interprétés comme différents de l'arrière-plan lorsque plusi
    cumul = cumul/1.5 + bin/5;

```



```

if mod(i, 2) == 0 & i > 50
    cumulTot = cumulTot + im2bw(cumul, 0.45);

    % Remplir les trous en ajoutant du blanc sur le tour de l'image pour
    % remplir les trous sur le périmètre
    cumulTot = padarray(cumulTot,[1 1],1,'pre'); % ajout ligne blanche en haut et c
    cumulTot = padarray(cumulTot,[0 1],1,'post'); % ajout colonne blanche à gauche
    cumulTot = imfill(cumulTot, 'holes');
    % Enlever les colonnes et ligne ajoutées
    cumulTot = cumulTot(2:end, 2:end-1);

    % Élimination de faux positifs en début d'essai
    if i < 100
        if sum(sum(cumulTot(1:round(longueur/8), :))) < sum(sum(cumulTot(round(longe
            cumulTot(round(longueur/8):longueur, :) = 0;
        end
    end

    % Conserver uniquement la région connectée la plus grande
    cumulTot = bwareafilt(logical(cumulTot), 1);

    % Calcul du pourcentage d'aire givrée
    aire = round(sum(sum(cumulTot))/(length(cumulTot)*length(cumulTot(1,:)))*100);
end

subplot(1,2,1);imshow(orig);
subplot(1,2,2);imshow(cumulTot);
drawnow;
set(gcf, 'color', 'blue');

% Évaluation du critère d'échec
if aire<30
    title("Aire givrée: "+aire+"%\newline Temps: "+temps+"s");
else
    title("\color{red}ÉCHEC \color{black}Aire givrée: "+aire+"%\newline Temps: "+te
end

frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);
end

close(v);

end

```

### B.3 Détection du givre pour les essais SNW

```
%%%%%%%%%  
% snw.m %  
%%%%%%%%%
```

```
% Pour chacun des répertoires d'essais, l'algorithme de détection  
% du givre pour les essais snw est appliqué et le critère d'échec  
% évalué. Une vidéo montrant l'évolution dans le temps de l'image  
% réelle, du givre détecté, le temps écoulé et du pourcentage de la  
% plaque givrée est affichée et enregistrée. Un message apparaît  
% lorsque le critère d'échec est observé.
```

```
clear all;
```

```
% Répertoires de l'essai  
basePath = '/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/data/';
```

```
essai.a = 'SNWH473/';  
essai.b = 'SNWH475/';  
essai.c = 'SNWH476/';  
essai.d = 'SNWH477/';  
essai.e = 'SNWH478/';  
essai.f = 'SNWH479/';
```

```
noms = fieldnames(essai);
```

```
% Boucle sur les essais  
for e = 1:length(noms)
```

```
    % Initialisation de la vidéo
```

```
    v = VideoWriter(['/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/detection' essai.(no  
    v.FrameRate = 3;  
    open(v);
```

```
    essaiPath = essai.(noms{e});  
    plaquePath = [basePath essaiPath 'plaque/'];
```

```
% Images de la plaque seulement  
images = imageSet(plaquePath, 'recursive');
```

```
I = images(1).read(1);
```

```
% Nombre d'image dans la séquence  
N = images(1).Count;
```

```

% Dimensions de l'image
largeur = length(I(1,:,1));
longueur = length(I(:, 1,1));

% Initialisation
temps = 0;
aire = 0;
cumul = zeros(longueur, largeur);
stack = [];
se = strel('disk',15);

% Boucle sur les images d'un essai
for i = 1:images(1).Count
    I = images(1).read(i);

    % Pour une raison inconnue, parfois I est de 503x303 au
    % lieu de 503x302. Pour régler ce problème:
    if length(I(1,:,1)) ~= largeur
        I = I(:, 1:end-1,:);
    end
    if length(I(:, 1,1)) ~= longueur
        I = I(1:end-1, :, :);
    end

    % ajout de l'image actuelle à la séquence d'images
    % utilisée par le filtre de Kalman pour prédire l'image suivante.
    stack(:,:,i) = I(:,:,1);

    % Filtre de Kalman
    kalman = Kalman_Stack_Filter(stack, 0.9, 1);
    bin = kalman(:,:,i);

    if i<60 % Élimination de faux positifs en début d'essai
        bin = zeros(longueur, largeur);
    else
        bin = uint8(bin);
        bin(bin<220) = 0; % segmentation avec un seuil de 220
        bin = logical(bin);

        % Accumuler les pixels interprétés comme du givre.
        cumul = logical((cumul + bin)/2);
        bin = cumul;
    end

    % Calcul du pourcentage d'aire givrée
    aire = round(sum(sum(bin))/(length(bin)*length(bin(1,:)))*100);

    subplot(1,2,1); imshow(I);

```

```

subplot(1,2,2); imshow(bin);

% Évaluation du critère d'échec
if aire<30
    title("Aire givrée: "+aire+"%\newline Temps: "+temps+"s");
else
    title("\color{red}ÉCHEC \color{black}Aire givrée: "+aire+"%\newline Temps: "+temps+"s");
end

set(gcf, 'color', 'blue');
drawnow;

temps = temps + 20; % photos aux 20 secondes

frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);
end

close(v);

end

```

## B.4 Extraction de la plaque

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% plaqueManuel.m %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% L'utilisateur sélectionne les quatre coins de la plaque sur la
% première photo de l'essais. Ensuite, l'image est transformée de
% façon a obtenir une vue orthogonale de la plaque ayant les
% dimensions de la plaque réelle. Ces images sont enregistrées dans
% le sous-répertoire plaque/.

%% Initialisation
clear all;

% Dimensions connues de la plaque: 500mmx300mm
dim = [0 500; 300 500; 300 0; 0 0];
% Pour WSET: 300mmx100mm
% dim = [0 300; 100 300; 100 0; 0 0];

% répertoire de l'essais comprenant les sous-répertoires "visuel", "plaque"
% et "thermique"

basepath = '/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/data/SNWH479';

```

```

% images(1): photos de l'essais
images = imageSet([basepath '/visuel/'], 'recursive');

%% vue orthogonale
% obtenir une vue orthogonale à partir des coordonnées des coins de
% la plaque.

% Première image pour détection de la plaque: avant le début de l'essai
I = images(1).read(1);
I = imresize(I, 0.5);

% L'utilisateur double-clique sur chacun des coins de la plaque
figure
imshow(I)

[x1,y1] = getpts
[x2,y2] = getpts
[x3,y3] = getpts
[x4,y4] = getpts

X = [x3 x4 x2 x1]';
Y = [y3 y4 y2 y1]';

% Transformation projective de l'image
transformation = fitgeotrans([X Y],dim,'projective');
T = transformation.T;

% colorer tous les pixels n'appartenant pas à la plaque noir.
for j = 1:length(I(1, :, 1))
    for i = 1:length(I(:, 1, 1))
        if ~inpolygon(i, j, Y, X)
            I(i, j, 1) = 0;
        end
    end
end

% créer un mask noir et blanc de l'image
% la plaque est blanche
masque = logical(I(:, :, 1));

% Appliquer la transformation à chaque image de l'essais et
% l'enregistrer dans le sous répertoire plaque/
for l = 1:images.Count
    I = images(1).read(l);
    I = imresize(I, 0.5);

    % application du mask créer avec la première image

```

```

I = bsxfun(@times, I, cast(masque, 'like', I));
[plaque, plaqueRef] = imwarp(I,transformation);

% Rogner pour conserver uniquement la plaque
nonZeroCols = find(any(plaque(:,:,1)));
minCol = min(nonZeroCols);
maxCol = max(nonZeroCols);
nonZeroRows = find(any(plaque(:,:,1), 2));
minRow = min(nonZeroRows);
maxRow = max(nonZeroRows);
plaque = im2double(plaque(minRow:maxRow, minCol:maxCol, :));

% Enregistrer les images résultantes
imwrite(plaque, [basepath '/plaque/' num2str(l, '%03.f') '.jpg'])
end

```

## B.5 Segmentation automatique de la plaque pour les essais SNW et LZR

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% plaque.m %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Pour chacun des répertoires d'essais, l'algorithme de détection
% automatique de la plaque est appliqué. Les images contenant
% seulement la plaque en vue orthogonale sont enregistrées.

clear all;
close all;

% Répertoires de l'essai
basePath = '/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/data/';

essai.a = 'SNWH473/';
essai.b = 'SNWH474/';
essai.c = 'SNWH479/';

essai.e = '18LZRB001/';
essai.f = '18LZRB002/';
essai.g = '18LZRB003/';
essai.h = '18LZRB004/';
essai.i = '18LZRB006/';
essai.j = '18LZRB007/';

noms = fieldnames(essai);

% Dimensions réelle de la plaque (mm)

```

```

dim = [0 500; 300 500; 300 0; 0 0];

% Création d'un noyau pour convolution
largeurFiltre = 5;
noyau = -1 * ones(largeurFiltre);
noyau(ceil(largeurFiltre/2), ceil(largeurFiltre/2)) = -sum(noyau(:)) - 1 + largeurFiltre^2
noyau = noyau / sum(noyau(:))

% Boucle sur les essais
for e = 1:9
    clear r;

    % Initialisation de la vidéo
    v = VideoWriter(['/home/david/Documents/UQAC/maitrise/LZR 20180618/plaqueAuto'essai.(n
    v.FrameRate = 0.3;
    open(v);

    essaiPath = essai.(noms{e});
    plaquePath = [basePath essaiPath 'visuel/'];

    images = imageSet(plaquePath, 'recursive');
    I = images(1).read(1);

    adj = I;

    % Saturer les couleurs qui sont dans le 1% inférieur et
    % supérieur pour chaque canal R, G et B.
    adj(:,:,1) = imadjust(I(:,:,1), stretchlim(I(:,:,1)), []);
    adj(:,:,2) = imadjust(I(:,:,2),stretchlim(I(:,:,2)), []);
    adj(:,:,3) = imadjust(I(:,:,3),stretchlim(I(:,:,2)), []);

    imshowpair(I, adj, 'montage');
    set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
    frame = getframe(gcf);
    writeVideo(v, frame);

    % Détection des contours dans l'image RGB sans convertir en
    % dégradés de gris
    edges = coloredges(adj);

    imshowpair(I, edges, 'montage');
    set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
    frame = getframe(gcf);
    writeVideo(v, frame);

    % Convoluer l'image avec le noyau défini plus haut
    edges = imfilter(edges, noyau);

```

```

edges = imfilter(edges, noyau);
edges = imfilter(edges, noyau);

imshowpair(I, edges, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Binariser l'image avec un seuil trouver par l'algorithme d'Otsu
bin = imbinarize(edges);

imshowpair(I, bin, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Conserver uniquement les 200 régions connectées ayant le plus
% grand périmètre
bin = bwpropfilt(logical(bin),'perimeter',200);

imshowpair(I, bin, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Dilater l'image à l'aide d'un élément structurant en forme de disque
bin = imdilate(bin, strel('disk', 5));

imshowpair(I, bin, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Inverser l'image
bin = ~bin;

imshowpair(I, bin, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Conserver uniquement la plus grande région connectée: la plaque
bin = bwareafilt(bin, 1);

imshowpair(I, bin, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

```



```

% Remplir les trous
bin = imfill(bin, 'holes');

imshowpair(I, bin, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Ouverture de l'image avec des lignes horizontales et verticales
bin = imopen(bin, strel('line', 400, 2));
bin = imopen(bin, strel('line', 200, 92));

imshowpair(I, bin, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Garder uniquement la plus grande région connectée et obtenir
% ses dimensions et son centre
bin = bwareafilt(bin, 1);
s = regionprops(bin);

hauteur = round(s.BoundingBox(4));
largeur = round(s.BoundingBox(3));

centrex = round(s.BoundingBox(1)+largeur/2);
centrey = round(s.BoundingBox(2)+hauteur/2);

% choix de 1000 points à l'intérieur d'un rectangle dans la plaque
%%% coordonnées en x (haut et bas)
a = centrex - round(0.5*largeur/2);
b = centrex + round(0.5*largeur/2);
r(2,:) = round((b-a).*rand(1000,1) + a);

%%% coordonnées en y (gauche et droite)
a = centrey - round(0.5*hauteur/2);
b = centrey + round(0.5*hauteur/2);
r(1,:) = round((b-a).*rand(1000,1) + a);

g = [];
for n = 1:1000
    if bin(r(1,n), r(2,n))
        g = [g r(:,n)];
    end
end

h = g;

```

```

k = g;
l = g;

imshowpair(I, bin, 'montage');
hold on
scatter(g(2,:), g(1,:));
scatter(h(2,:), h(1,:));
scatter(k(2,:), k(1,:));
scatter(l(2,:), l(1,:));
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Déplacer les 1000 points dans toutes les directions jusqu'au
% périmètre de la plaque

% Boucle sur les points
for i = 1:length(g)
    while bin(g(1, i), g(2, i)) == 1
        g(1, i) = g(1, i) - 1;
    end
    while bin(h(1, i), h(2, i)) == 1
        h(2, i) = h(2, i) - 1;
    end

    while bin(k(1, i), k(2, i)) == 1
        k(1, i) = k(1, i) + 1;
    end
    while bin(l(1, i), l(2, i)) == 1
        l(2, i) = l(2, i) + 1;
    end
end

imshowpair(I, bin, 'montage');
hold on
scatter(g(2,:), g(1,:));
scatter(h(2,:), h(1,:));
scatter(k(2,:), k(1,:));
scatter(l(2,:), l(1,:));
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Déterminer les équations des droites représentant les côtés
% de la plaque en utilisant les points déplacés jusqu'au périmètre
droite1 = polyfit(l(1,:), l(2,:), 1);
droite2 = polyfit(h(1,:), h(2,:), 1);
droite3 = polyfit(k(2,:), k(1,:), 1);

```

```

droite4 = polyfit(g(2,:),g(1,:), 1);

% Obtenir une série de point sur ces droites pour la
% représentation graphique
points1(1, :) = polyval(droite1(1, :), 1:length(bin(:, 1)));
points2(1, :) = polyval(droite2(1, :), 1:length(bin(:, 1)));
points3(1, :) = polyval(droite3(1, :), 1:length(bin(1, :)));
points4(1, :) = polyval(droite4(1, :), 1:length(bin(1, :)));

imshowpair(I, bin, 'montage');
hold on
plot(points1(1, :), 1:length(bin(:, 1)), 'linewidth', 5);
plot(points2(1, :), 1:length(bin(:, 1)), 'linewidth', 5);
plot(1:length(bin(1, :)), points3(1, :), 'linewidth', 5);
plot(1:length(bin(1, :)), points4(1, :), 'linewidth', 5);
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Trouver les coordonnées des intersections des droites (coins
% de la plaque)
[x1 y1] = polyxpoly(points1, 1:length(bin(:, 1)), 1:length(bin(1, :)), points3(1, :));
[x2 y2] = polyxpoly(points1, 1:length(bin(:, 1)), 1:length(bin(1, :)), points4);
[x3 y3] = polyxpoly(points2, 1:length(bin(:, 1)), 1:length(bin(1, :)), points3);
[x4 y4] = polyxpoly(1:length(bin(1, :)), points4, points2(1,:), 1:length(bin(:, 1)));

RGB = insertMarker(I,[x1 y1], 'o', 'size', 25);
imshow(RGB);
imshowpair(I, bin, 'montage');
hold on
plot(points1(1, :), 1:length(bin(:, 1)), 'linewidth', 5);
plot(points2(1, :), 1:length(bin(:, 1)), 'linewidth', 5);
plot(1:length(bin(1, :)), points3(1, :), 'linewidth', 5);
plot(1:length(bin(1, :)), points4(1, :), 'linewidth', 5);
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Coordonnées des coins de la plaque
X = [x3 x1 x2 x4]';
Y= [y3 y1 y2 y4]';

% Mettre tous les pixels hors plaque à 0
for j = 1:length(I(1, :, 1))
    for i = 1:length(I(:, 1, 1))
        if ~inpolygon(i, j, Y, X)
            I(i, j, 1) = 0;
            I(i, j, 2) = 0;

```

```

        I(i, j, 3) = 0;
    end
end
end

% Obtenir une vue orthogonale de l'image en considérant les
% dimensions réelle de la plaque
transformation = fitgeotrans([X Y],dim,'projective');
T = transformation.T;
[plaque, plaqueRef] = imwarp(I,transformation);

imshowpair(I,plaque, 'montage');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
frame = getframe(gcf);
writeVideo(v, frame);

% Créer un masque noir et blanc de l'image: la plaque est blanche
masque = imbinarize(rgb2gray(plaque), 0.001);

% Appliquer la transformation à chaque image de l'essais et
% enregistrer dans le répertoire plaque/

% Boucle sur les images
for l = 1:images.Count
    I = images(1).read(l);

    % Transformation géométrique
    [plaque, plaqueRef] = imwarp(I, transformation);
    % Application du masque créé avec la première image
    plaque = bsxfun(@times, plaque, cast(masque, 'like', plaque));

    % Rogner pour conserver uniquement la plaque
    nonZeroCols = find(any(plaque(:, :, 1)));
    minCol = min(nonZeroCols);
    maxCol = max(nonZeroCols);
    nonZeroRows = find(any(plaque(:, :, 1), 2));
    minRow = min(nonZeroRows);
    maxRow = max(nonZeroRows);
    plaque = im2double(plaque(minRow:maxRow, minCol:maxCol, :));

    % Enregistrer les images résultantes
    imwrite(plaque, [basepath '/plaqueAuto/' num2str(l) '.jpg'])

    imshowpair(I, plaque, 'montage');
    set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
    frame = getframe(gcf);
    writeVideo(v, frame);
end
end

```

```
close(v);  
end
```

## Appendix C

# Fonctions MATLAB

Cet annexe présente les fonctions supplémentaires ajoutés à MATLAB qui ont été utilisées dans les programmes de l'annexe 1.

### C.1 Filtre de Kalman

```
function imageStack=Kalman_Stack_Filter(imageStack,gain,percentvar)
% function imageStack=Kalman_Stack_Filter(imageStack,percentvar,gain)
%
% Purpose
% Implements a predictive Kalman-like filter in the time domain of the image
% stack. Algorithm taken from Java code by C.P. Mauer.
% http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/kalman.html
%
% Inputs
% imageStack - a 3d matrix comprising of a noisy image sequence. Time is
%               the 3rd dimension.
% gain - the strength of the filter [0 to 1]. Larger gain values means more
%         aggressive filtering in time so a smoother function with a lower
%         peak. Gain values above 0.5 will weight the predicted value of the
%         pixel higher than the observed value.
% percentvar - the initial estimate for the noise [0 to 1]. Doesn't have
%               much of an effect on the algorithm.
%
% Output
% imageStack - the filtered image stack
%
% Note:
% The time series will look noisy at first then become smoother as the
```

```

% filter accumulates evidence.
%
% Rob Campbell, August 2009

% Process input arguments
if nargin<2, gain=0.5;          end
if nargin<3, percentvar = 0.05; end

if gain>1.0||gain<0.0
    gain = 0.8;
end

if percentvar>1.0 || percentvar<0.0
    percentvar = 0.05;
end

%Copy the last frame onto the end so that we filter the whole way
%through
imageStack(:,:,end+1)=imageStack(:,:,end);

%Set up variables
width = size(imageStack,1);
height = size(imageStack,2);
stacksize = size(imageStack,3);

tmp=ones(width,height);

%Set up priors
predicted = imageStack(:,:,1);
predictedvar = tmp*percentvar;
noisevar=predictedvar;

%Now conduct the Kalman-like filtering on the image stack
for i=2:stacksize-1
    stackslice = imageStack(:,:,i+1);
    observed = stackslice;

    Kalman = predictedvar ./ (predictedvar+noisevar);
    corrected = gain*predicted + (1.0-gain)*observed + Kalman.*(observed-predicted);
    correctedvar = predictedvar.*(tmp - Kalman);

```

```

    predictedvar = correctedvar;
    predicted = corrected;
    imageStack(:,:,i)=corrected;
end

```

```

imageStack(:,:,end)=[];

```

## C.2 Filtre homomorphique

```

% HOMOMORPHIC - Performs homomorphic filtering on an image.
%
% Function performs homomorphic filtering on an image. This form of
% filtering sharpens features and flattens lighting variations in an image.
% It usually is very effective on images which have large variations in
% lighting, for example when a subject appears against strong backlighting.
%
%
% Usage: newim =
% homomorphic(inimage,boost,CutOff,order,lhistogram_cut,uhistogram_cut, hndl)
% homomorphic(inimage,boost,CutOff,order,lhistogram_cut,uhistogram_cut)
% homomorphic(inimage,boost,CutOff,order,hndl)
% homomorphic(inimage,boost,CutOff,order)
%
% Parameters: (suggested values are in brackets)
%      boost      - The ratio that high frequency values are boosted
%                   relative to the low frequency values (2).
%      CutOff     - Cutoff frequency of the filter (0 - 0.5)
%      order      - Order of the modified Butterworth style filter that
%                   is used, this must be an integer > 1 (2)
%      lhistogram_cut - Percentage of the lower end of the filtered image's
%                   histogram to be truncated, this eliminates extreme
%                   values in the image from distorting the final result. (0)
%      uhistogram_cut - Percentage of upper end of histogram to truncate. (5)
%      hndl       - Optional handle to text box for updating
%                   messages to be sent to a GUI interface.
%
% If lhistogram_cut and uhistogram_cut are not specified no histogram truncation will be
% applied.
%
%
% Suggested values: newim = homomorphic(im, 2, .25, 2, 0, 5);
%
% homomorphic called with no arguments invokes GUI interface.
%

```



```

% or simply    homomorphic    to invoke the GUI    - GUI version does not work!

% Copyright (c) 1999-2001 Peter Kovesi
% School of Computer Science & Software Engineering
% The University of Western Australia
% http://www.csse.uwa.edu.au/
%
% Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy
% of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal
% in the Software without restriction, subject to the following conditions:
%
% The above copyright notice and this permission notice shall be included in
% all copies or substantial portions of the Software.
%
% The Software is provided "as is", without warranty of any kind.

% June 1999
% December 2001 cleaned up and modified to work with colour images

function him = homomorphic(im, boost, CutOff, order, varargin)

%    if nargin == 0                % invoke GUI if it exists
% if exist('homomorphicGUI.m');
%     homomorphicGUI;
%     return;
% else
%     error('homomorphicGUI does not exist');
% end
%
%    else

if ndims(im) == 2 % Greyscale image
    him = Ihomomorphic(im, boost, CutOff, order, varargin);

else
    % Assume colour image in RGB format
    hsv = rgb2hsv(im); % Convert to HSV and apply homomorphic
    % filtering to just the intensity component.
    hsv(:,:,3) = Ihomomorphic(hsv(:,:,3), boost, CutOff, order, varargin);
    him = hsv2rgb(hsv); % Convert back to RGB
end

%    end

%-----
% Internal function that does the real work
%-----

```

```

function him = Ihomomorphic(im, boost, CutOff, order, varargin)

    % The possible elements in varargin are:
    % {lhistogram_cut, uhistogram_cut, hndl}

    varargin = varargin{:};

    if nargin == 5
        nopparams = length(varargin);
        end

        if (nopparams == 3)
            dispStatus = 1;
            truncate = 1;
            lhistogram_cut = varargin{1};
            uhistogram_cut = varargin{2};
            hndl = varargin{3};
        elseif (nopparams == 2)
            dispStatus = 0;
            truncate = 1;
            lhistogram_cut = varargin{1};
            uhistogram_cut = varargin{2};
        elseif (nopparams == 1)
            dispStatus = 1;
            truncate = 0;
            hndl = varargin{1};
        elseif (nopparams == 0)
            dispStatus = 0;
            truncate = 0;
        else
            disp('Usage: newim = homomorphic(inimage,LowGain,HighGain,CutOff,order,lhistogram_cut,uhistogram_cut,hndl,boost)');
            error('or newim = homomorphic(inimage,LowGain,HighGain,CutOff,order)');
        end

        [rows,cols] = size(im);

        im = normalise(im); % Rescale values 0-1 (and cast
        % to 'double' if needed).
        FFTlogIm = fft2(log(im+.01)); % Take FFT of log (with offset
        % to avoid log of 0).
        h = highboostfilter([rows cols], CutOff, order, boost);
        him = exp(real(ifft2(FFTlogIm.*h))); % Apply the filter, invert
        % fft, and invert the log.

        if truncate

% Problem:
% The extreme bright values in the image are exaggerated by the filtering.

```

```

% These (now very) bright values have the overall effect of darkening the
% whole image when we rescale values to 0-255.
%
% Solution:
% Construct a histogram of the image. Find the level below which a high
% percentage of the image lies (say 95%). Saturate the grey levels in
% the image to this level.

%{
if dispStatus
    set(hndl,'String','Calculating histogram and truncating...');
    drawnow;
else
    disp('Calculating histogram and truncating...');
end
%}

him = histtruncate(him, lhistogram_cut, uhistogram_cut);

    else
him = normalise(him); % No truncation, but fix range 0-1
end

```